

**VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra telekomunikační techniky**

**Testování optického zesilovače pro optické sítě
Testing of optical amplifiers for optical networks**

2017

Jan Wasserbauer

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Jan Wasserbauer**

Studijní program: N2647 Informační a komunikační technologie

Studijní obor: 2601T013 Telekomunikační technika

Téma: **Testování optického zesilovače pro optické sítě**
Testing of Optical Amplifiers for Optical Networks

Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

Cílem práce bude provést důkladnou analýzu chování optického zesilovače aplikovaného do optické sítě. Student rovněž bude provádět simulace v softwarové aplikaci Optiwave, kde ověří některé parametry optického zesilovače zapojeného v topologii optické sítě.

1. Prostudujte problematiku xWDM sítí.
2. Proveďte teoretický rozbor využití vláknových zesilovačů pro xWDM sítě.
3. Sestrojte experimentální pracoviště pro testování optického zesilovače implementovaného do optické sítě.
4. Proměřte optickou trasu se zapojeným zesilovačem.
5. Proveďte simulace daného zesilovače v softwarové aplikaci Optiwave.
6. Zhodnoťte naměřené a simulované výsledky.

Seznam doporučené odborné literatury:

- [1] PREMARATNE, M., Agrawal, G., P. *Light Propagation in Gain Media: Optical Amplifiers*, Cambridge: Cambridge University Press, 2011. 284 s. ISBN 978-0521493482.
- [2] BJARKLEV, A. *Optical Fiber Amplifiers: Design and System Applications (The Artech House Optoelectronics Library)*, Vydání 1. Artech Print on Demand, 1993. 408 s. ISBN 978-0890066591.
- [3] SHIMADA, S., Ishio, H. *Optical Amplifiers and their Applications*, Vydání 1. John Wiley & Sons, 1994. 288 p. ISBN 978-0471940050.
- [4] LEE, T. P. *Current Trends in Optical Amplifiers and Their Applications (Selected Topics in Electronics and Systems)*. World Scientific Pub Co Inc, 1996. 222 s. ISBN 978-9810226954.
- [5] DUTTA, N a Qiang WANG. *Semiconductor optical amplifiers*. Vydání 2. ISBN 978-981-4489-034.
- [6] NEMOVA, G. *Optical Amplifiers (Physics Research and Technology)*. Nova Biomedical Books, 2011. 337 s. ISBN 978-1612098357.
- [7] MA, Maode. *Current Research Progress of Optical Networks*. 1st Edition. Springer, 2009. 282 p. ISBN 978-1402098888
- [8] LAM, Cedric. *Passive Optical Networks: Principles and practice*. Oxford: Elsevier Onc., 2007. 324 p. ISBN 978-0-12-373853-0

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Jan Látal, Ph.D.**

Datum zadání: 01.09.2015

Datum odevzdání: 28.04.2017

		
doc. Ing. Miroslav Vozňák, Ph.D. vedoucí katedry		prof. RNDr. Václav Snášel, CSc. děkan fakulty

Prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

V Ostravě dne: 28. dubna 2017


.....
podpis studenta

Poděkování

Rád bych poděkoval Ing. Janu Látalovi, Ph.D. za jeho odbornou pomoc a vedení mé práce. Dále bych chtěl poděkoval Ing. Kubovi Kolářovi, Ing. Zdeňkovi Wilčekovi a Bc. Josefu Filipovi za jejich pomoc při vyřešení dílčích technických problémů, díky kterým bylo možné práci dokončit.

Prohlášení zástupce spolupracující právnické nebo fyzické osoby

„Souhlasím se zveřejněním této diplomové práce dle požadavků čl. 26, odst. 9 Studijního a zkušebního řádu pro studium v magisterských programech VŠB-TUOstrava.“

Dne: 28. dubna 2017

.....
.....

podpis zástupce

Abstrakt

Diplomová práce se zabývá popisem a testováním optických zesilovačů, které se používají v dnešních optických komunikacích. Diplomová práce je rozdělená na několik částí.

V první části je teoreticky rozebrán princip funkce xWDM sítí a optických zesilovačů se zaměřením především na erbiem dopovaný vláknový optický zesilovač. Tato část dále popisuje fyzikální principy na jejíchž základu zesilovač pracuje a které ovlivňují chování zesilovače při teplotním zatížení.

Druhá část se zabývá experimentálním měřením, které bylo provedeno za účelem posouzení, jakým způsobem se projevuje teplota zejména pod bodem mrazu a jak se mění zesilovací schopnosti zesilovače. Měření bylo provedeno v případě kdy je vstupním signálem širokospektrální signál a následně pak datový signál xWDM sítě.

Poslední část se zabývá simulováním reálné optické sítě za účelem porovnání výsledků pomocí programového prostředí Optiwave OptiSystem.

Klíčová slova

EDFA, EDF, zesilovač, xWDM, teplota, Erbiem dopované optické vlákno

Abstract

The thesis focuses on the description and testing of optical amplifiers which are used in optical communications these days. The thesis is divided into three parts.

The first part is aimed on the theoretical background, describes the principles of xWDM networks and optical amplifiers with focusing on the Erbium doped fiber optical amplifier. This part also describes the physical principles based on which the doped amplifier works and which have impact on the amplifier's behavior during temperature load.

The second part focuses on experimental measuring, which was secured in order to validate which way the temperature below freezing point influences the amplifying abilities of the amplifier. Then the measuring was processed with the input broadband signal and subsequently when the input was the data signal of xWDM network.

The thesis lastly deals with simulation of a real optical network for the comparison of the results by using the interface Optiwave OptiSystem program.

Key words

EDFA, EDF, amplifier, xWDM, temperature, Erbium doped optical fiber.

Obsah

Seznam použitých zkratk	- 12 -
Seznam ilustrací a seznam tabulek	- 14 -
Úvod	- 18 -
1 Optické přístupové sítě	- 19 -
1.1 Základní prvky OAN	- 19 -
1.2 Dělení podle ukončení OAN, typy FTTx	- 19 -
1.3 Topologické řazení OAN	- 20 -
1.4 Aktivní a pasivní OAN	- 22 -
1.5 Přístupová síť WDM PON	- 23 -
1.5.1 Architektura WDM-PON	- 25 -
2 Optické zesilovače	- 27 -
2.1 Princip funkce optického zesilovače	- 27 -
2.1.1 Spontánní emise	- 27 -
2.1.2 Stimulovaná emise	- 28 -
2.2 Dělení zesilovačů podle způsobu práce se signálem	- 28 -
2.2.1 Princip 3R obnovy	- 29 -
2.3 Dělení zesilovačů podle umístění v optické trase	- 30 -
2.3.1 Výkonový zesilovač	- 30 -
2.3.2 Průběžný zesilovač	- 30 -
2.3.3 Předzesilovač	- 31 -
2.4 Parametry zesilovačů	- 31 -
3 Typy optických zesilovačů	- 33 -
3.1 Polovodičové zesilovače	- 33 -
3.2 Ramanův zesilovač	- 35 -
3.2.1 Princip zesílení	- 35 -
3.2.2 Dělení Ramanových zesilovačů	- 36 -
3.3 Optické zesilovače s vláknovou dotací	- 36 -
3.3.1 Princip funkce	- 36 -
3.4 Optické vláknové zesilovače EDFA	- 37 -
3.4.1 Princip činnosti EDFA	- 38 -
3.4.2 Tříúrovňový energetický systém EDFA	- 38 -

3.4.3	Dvouúrovňový energetický systém EDFA.....	- 42 -
3.4.4	Šum zesílené náhodné emise ASE	- 44 -
3.4.5	Vhodná délka zesilovacího vlákna a typy pumpování	- 45 -
3.4.6	Teplotní závislost EDFA zesilovače	- 46 -
3.5	Hybridní optické zesilovače	- 49 -
4	Návrh a příprava měřicího pracoviště	- 54 -
4.1	Měřicí pracoviště.....	- 54 -
4.1.1	Vodní chlazení Peltierových článků	- 59 -
4.1.2	Modifikovaný mrazicí přístroj.....	- 61 -
4.1.3	Měření teploty uvnitř měděné kostky	- 63 -
4.1.4	Energetické zásobování zesilovače	- 65 -
4.1.5	Experimentální Erbiem dopovaná optická vlákna.....	- 66 -
5	Měření tepelného vlivu na experimentální Erbiem dopovaná optická vlákna	- 68 -
5.1	Experimentální měření EDF vláken v C a L pásmu.....	- 69 -
5.1.1	Experimentální vlákno SAE-1	- 69 -
5.1.2	Experimentální vlákno SGAE-1	- 72 -
5.1.3	Experimentální vlákno SGAE-2.....	- 75 -
5.1.4	Porovnání vláken mezi sebou	- 78 -
5.1.5	Shrnutí vlastností experimentálních vláken.....	- 82 -
6	Testování teplotního vlivu na EDFA zesilovač zapojený do CWDM PON sítě	- 84 -
6.1	Popis použitých komponent pro testovací síť	- 84 -
6.2	Měření optické sítě CWDM	- 85 -
6.2.1	Měření útlumu optických tras.....	- 88 -
6.2.2	Měření chromatické disperze optických tras	- 90 -
6.2.3	Měření polarizační vidové disperze.....	- 91 -
6.3	Testování EDFA zesilovače v síti CWDM	- 92 -
6.3.1	Testování experimentálního vlákna SAE-1	- 94 -
6.3.2	Testování experimentálního vlákna SGAE-1	- 100 -
6.3.3	Testování experimentálního vlákna SGAE-2	- 104 -
6.3.4	Srovnání experimentálních testovacích vláken v síti CWDM.....	- 109 -
7	Simulace CWDM sítě při zapojení experimentálních EDF vláken v aplikaci Optiwave- ..	- 113 -
7.1	Vysílací a přijímací jednotky	- 114 -
7.2	Optická distribuční síť.....	- 115 -

7.3	Simulace experimentálního vlákna SAE-1	- 118 -
7.3.1	Simulace experimentálního vlákna SGAE-1	- 123 -
7.3.2	Simulace experimentálního vlákna SGAE-2	- 128 -
	Závěr	- 133 -
	Použitá literatura	- 136 -
	Seznam příloh.....	- 139 -

Seznam použitých zkratek

Zkratka	Význam
AON	Active optical network
APON	Asynchronous transfer mode passive optical network
ASE	Amplified spontaneous emission
AWG	Arrayed waveguide grating
BER	Bit error ration
BPON	Broadband passive optical network
CD	Chromatic dispersion
CWDM	Coarse wavelength division multiplexing
DCF	Dispersion compensation fiber
DRA	Distributed Raman amplifier
DTS	Distributed temperature system
DW	Downstream
DWDM	Dense wavelength division multiplexing
EDFA	Erbium doped fiber amplifier
ETDFA	Erbium thulium doped fiber amplifier
FTTB	Fiber to the building
FTTC	Fiber to the curb
FTTCab	Fiber to the cabinet
FTTH	Fiber to the home
FTTO	Fiber to the office
GPON	Gigabit-capable passive optical network
GS EDFA	Gain-shifted erbium doped fiber amplifier
HOA	Hybrid optical amplifier
LRA	Lumped Raman amplifier
NA	Numerická apertura
OAN	Optical access network
O-E-O	Optical-electric-optical transfer
ODN	Optical distribution network

OLT	Optical link termination
ONU	Optical network unit
ONT	Optical network termination
OSI	Open systems interconnection
OTDR	Optical time domain Reflectometer
PMD	Polarization mode dispersion
P2MP	Point to multipoint
P2P	Point to point
Q factor	Quality factor
RSOA	Reflective semiconductor optical amplifier
SNR	Signal to noise ration
SOA	Semiconductor optical amplifier
SP	Spanning Three
SFP	Small form-factor pluggable
TDFA	Thulium doped fiber amplifier
TDMA	Time division multiple access
TW-SOA	Traveling wave semiconductor optical amplifier
UP	Upstream
WDD	Wave division duplex
WDM	Wavelength division multiplex
WDMA	Wavelength division multiple access
WDM-PON	Wavelength division multiplexing passive optical network
xDSL	X Digital subscriber line
XGM	Cross gain modulation
XPM	Cross phase modulation

Seznam ilustrací a seznam tabulek

Číslo ilustrace	Název ilustrace	Číslo stránky
1.1	Sběrníková topologie sítě	20
1.2	Kruhová topologie sítě	21
1.3	Stromová topologie sítě	22
1.4	WDM-PON komunikace pevně stanovené vlnové délky	25
1.5	WDM-PON komunikace s nasazením AWG	27
2.1	Spontánní emise	28
2.2	Stimulovaná emise	28
2.3	Princip 3R obnovy optického signálu	30
2.4	Dělení zesilovačů podle umístění v optické trase	31
3.1	Princip polovodičových zesilovačů	35
3.2	Schéma optického vláknového EDFA zesilovače	38
3.3	Tří úroňový energetický systém	39
3.4	Graf populace tří úroňového energetického systému	40
3.5	Graf saturace zisku EDFA s ASE a bez ASE	42
3.6	Dvouhladinový energetický systém EDFA	42
3.7	Energetické úrovně mezi dvěma multiplety	43
3.8	Závislost výkonu EDFA na délce optického vlákna	46
3.9	Výsledky experimentálního měření vlivů teploty EDF	48
3.10	Zisk naměřený během experimentálního měření	49
3.11	Obecné znázornění podílu dělení HOA s EDFA-Raman	51
3.12	Porovnání HOAs v závislosti na BER	53
4.1	Technický výkres měděné kostky	55
4.2	Měřicí pracoviště	57
4.3	Měřicí pracoviště s polystyrenovou izolací	58
4.4	Příklad vodního chlazení	60
4.5	Mrazicí přístroj	62
4.6	Útroby mrazicího přístroje	63
4.7	Měřicí DTS systém	65

5.1	Blokové schéma měřicího pracoviště	68
5.2	Změřené hodnoty teplot systémem DTS	69
5.3	Výkonová charakteristika SAE1 při teplotě 25C	70
5.4	Teplotní charakteristika vstupu a výstupu SAE1 100mW	71
5.5	Teplotní charakteristika vstupu a výstupu SAE1 325mW	72
5.6	Výkonová charakteristika SGAE1 při teplotě 25C	73
5.7	Teplotní charakter vstupu a výstupu SGAE1 100mW	74
5.8	Teplotní charakter vstupu a výstupu SGAE1 125mW	75
5.9	Výkonová charakteristika SGAE2 při teplotě 25C	76
5.10	Teplotní charakter vstupu a výstupu SGAE2 100mW	77
5.11	Teplotní charakter vstupu a výstupu SGAE2 325mW	78
5.12	Srovnání experimentálních vláken 25C 100mW	79
5.13	Srovnání experimentálních vláken 25C 325mW	80
5.14	Srovnání experimentálních vláken -17.5C 100mW	81
5.15	Srovnání experimentálních vláken -17.5C 325mW	82
6.1	Schéma zapojení pro testování sítě CWDM	85
6.2	Infrastruktura optické sítě školy	86
6.3	Časová proměnlivost výkonu CWDM sítě	88
6.4	Výkonové spektrum sítě s Upstream a Downstream kanály	88
6.5	Příklad grafu měření útlumu trasy pomocí OTDR systému	89
6.6	Graf chromatické disperze pro trasu 20km	91
6.7	Schéma experimentálního měření na CWDM síti	92
6.8	Rackové zapojení v laboratoři EB315	93
6.9	Výkonová charakteristika SAE1 v CWDM 20km DW	95
6.10	Výkonová charakteristika SAE1 v CWDM 20km UP	97
6.11	Výkonová charakteristika SAE1 v CWDM 5km DW	98
6.12	Výkonová charakteristika SAE1 v CWDM 5km UP	100
6.13	Výkonová charakteristika SGAE1 v CWDM 20km DW	101
6.14	Výkonová charakteristika SGAE1 v CWDM 20km UP	102
6.15	Výkonová charakteristika SGAE1 v CWDM 5km DW	103
6.16	Výkonová charakteristika SGAE1 v CWDM 5km UP	104

6.17	Výkonová charakteristika SGAE2 v CWDM 20km DW	106
6.18	Výkonová charakteristika SGAE1 v CWDM 20km UP	107
6.19	Výkonová charakteristika SGAE1 v CWDM 5km DW	108
6.20	Výkonová charakteristika SGAE1 v CWDM 5km UP	109
6.21	Porovnání vláken při 25C v CWDM síti	110
6.22	Porovnání vláken při -17.5C v CWDM síti	111
7.1	Topologie optické sítě s EDFA zesilovačem	113
7.2	Zapojení vysílače	114
7.3	Optický detektor přijímače	115
7.4	Vstupní signál směr DW trasa 5km	117
7.5	Vstupní signál směr DW trasa 20km	117
7.6	Vstupní signál směr UP trasa 5km	118
7.7	Vstupní signál směr UP trasa 20km	118
7.8	Výsledek simulace SAE1 DW -17.5C 5km	119
7.9	Výsledek simulace SAE1 DW 25C 5km	119
7.10	Výsledek simulace SAE1 UP -17.5C 5km	120
7.11	Výsledek simulace SAE1 UP 25C 5km	121
7.12	Výsledek simulace SAE1 DW 25C 20km	121
7.13	Výsledek simulace SAE1 DW -17.5C 20km	122
7.14	Výsledek simulace SAE1 UP 25C 20km	122
7.15	Výsledek simulace SAE1 UP -17.5C 20km	123
7.16	Výsledek simulace SGAE1 DW 25C 5km	123
7.17	Výsledek simulace SGAE1 DW -17.5C 5km	124
7.18	Výsledek simulace SGAE1 UP 25C 5km	124
7.19	Výsledek simulace SGAE1 UP -17.5C 5km	125
7.20	Výsledek simulace SGAE1 DW 25C 20km	126
7.21	Výsledek simulace SGAE1 DW -17.5C 20km	126
7.22	Výsledek simulace SGAE1 UP 25C 20km	127
7.23	Výsledek simulace SGAE1 UP -17.5C 20km	127
7.24	Výsledek simulace SGAE2 DW 25C 5km	128
7.25	Výsledek simulace SGAE2 DW -17.5C 5km	129

7.26	Výsledek simulace SGAE2 UP 25C 5km	130
7.27	Výsledek simulace SGAE2 UP -17.5C 5km	130
7.28	Výsledek simulace SGAE2 DW 25C 20km	131
7.29	Výsledek simulace SGAE2 DW -17.5C 20km	131
7.30	Výsledek simulace SGAE2 UP 25C 20km	132
7.31	Výsledek simulace SGAE2 UP -17.5C 20km	132

Číslo tabulky	Název tabulky	Číslo stránky
1.1	Porovnání technologií CWDM a DWDM	24
1.2	Typy optických vláknových zesilovačů ve spektru	37
1.3	Srovnání základních typů HOA	52
1.4	Typy Peltierových článků	56
1.5	Parametry mrazicího přístroje	62
1.6	Parametry měřicího DTS systému	64
1.7	Parametry pump	66
1.8	Parametry WDM slučovače	66
1.9	Parametry experimentálních EDF vláken	67
1.10	Parametry širokospektrálního zdroje	68
1.11	Parametry SFP modulů 1000Base-ZX	85
1.12	Měření časové proměnlivosti výkonu v síti	87
1.13	Tabulka naměřených útlumů OTDR	89
1.14	Hodnoty CD pro optické trasy	90
1.15	Hodnoty PMD koeficientů	91
1.16	Nastavení výkonů vysílačů	115
1.17	Parametry testovacích vláken nastavených v simulaci	116
1.18	Parametry optického vlákna použité v simulaci	116

Úvod

Díky vysokým nárokům, které jsou v dnešní době kladeny na počítačové sítě, vznikly technologie pracující na principu přenosu světelných signálů. Jedná se tedy o optické sítě. Z hlediska funkce se dělí na aktivní a pasivní, podle toho, zda prvky ze kterých je síť složena potřebují ke své činnosti elektrickou energii. Pasivní optické sítě jsou budoucností, která se každým dnem stává víc a víc skutečnou. Díky přenosu signálu skrze světelný vlnovod dochází k jeho útlumu vlivem parazitních jevů, jako je například útlum. Aby optické pasivní sítě dokázaly překlenout často velké vzdálenosti, je potřeba aby byl signál, který je utlumen vlivem přenosu zesílen. Bez toho by tato síť nedokázala přenášet komunikaci na požadovanou vzdálenost a byla by nahrazena jinou alternativní technologií.

Právě optický zesilovač je zařízení, které umožňuje optickým sítím překlenout větší vzdálenosti díky tomu, že utlumený signál opět zesílí. Každá síť je tak rychlá, jak rychlá je její nejpomalejší část. Z tohoto důvodu musí zesilovače pracovat co nejrychleji. Za vývojem technologie těchto sítí tedy stojí vývoj technologie optických zesilovačů a právě ty jsou tématem této diplomové práce.

Na stránkách první kapitoly jsou popsány teoretické a principiální vlastnosti, na jejichž základě optické sítě fungují. Základní dělení sítí, jejich hierarchické uspořádání a prvky které využívají představují úvod do problematiky.

Druhá a třetí kapitola se zabývají obecným popisem optických zesilovačů, jejich dělení a vysvětlení základních principů, které využívají ke své funkci. Nejdominantnější typ optických zesilovačů je optický vláknový zesilovač s využitím speciálně upravených optických vláken, které jsou již při výrobě dopovány Lanthanoidy, tedy vzácnými zemními prvky, které mají vysokou kvantovou účinnost. Tímto typem zesilovačů se práce zabývá. Konkrétně se jedné o Erbium dopované optické vláknové zesilovače a jejich proměnlivost v závislosti na změnách teploty zejména pod bodem mrazu.

Čtvrtá kapitola popisuje experimentálně vytvořené měřicí pracoviště, pomocí kterého byly testovány experimentální Erbiová vlákna dodaná na základě spolupráce Indickým technologickým institutem sídlícím v Indii v Kalkatě.

V páté kapitole je popsáno měření vlivů teploty s nasazením optického širokospektrálního zdroje. Výsledky měření a podrobný popis chování jednotlivých vláken v závislosti na výkonu, kterým jsou buzeny a teploty jež na ně působila.

Šestá kapitola je zaměřena na testování experimentálních vláken při nasazení do optické sítě CWDM. Kapitola obsahuje popis chování jednotlivých vláken v síti, který byl empiricky změřen.

Poslední kapitola je fokusována na simulování nasazení experimentálních vláken v optické síti, tak jak tomu bylo v případě reálného měření. Cílem je posoudit výsledky matematických operací provedených na pozadí simulace, s výsledky reálného měření. Účelem je posouzení chování Erbiových vláken v závislosti na teplotním zatížení.

1 Optické přístupové sítě

Díky rychlému rozvoji v oblasti počítačových sítí se stále více zvyšují požadavky na přístupové sítě. Dnes se optické sítě nevyužívají tak, jak tomu bylo dříve, pouze na úrovni páteře, ale i v rámci sítě přístupové. Díky tomu byl zaveden nový pojem OAN. Důvodem je jejich rychle se rozšiřující využití, poměr ceny a výkonu a možnost zvyšování přenosové kapacity.

1.1 Základní prvky OAN

OLT – jedná se o optické linkové zakončení. Představuje rozhraní mezi páteří sítě a přístupovou sítí. Dále spravuje a řídí ONU a ONT jednotky.

ONU – optická síťová jednotka. Jejím úkolem je spojit koncovou síť, do které jsou zapojeni už samotní uživatelé s přístupovou sítí, nezávisle na tom, zda je koncová síť metalická, optická, či bezdrátová. Na ONU jednotku může navazovat další zařízení, například technologie xDSL.

ONT – optické síťové zakončení. Tento prvek je na straně uživatele. Jedná se o speciální případ ONU jednotky. Nepředpokládá použití dalších technologií na straně koncových sítí. Zajišťuje tedy rozhraní mezi koncovým zařízením účastníka a přístupovou sítí.

ODN – optická distribuční síť. Hierarchicky je prvním a základním prvkem OAN. Jedná se o veškeré přenosové prostředky, které se nachází mezi OLT a ONU/ONT. Představuje optická vlákna, rozbočovače, konektory, sváry i filtry.[2][4]

1.2 Dělení podle ukončení OAN, typy FTTx

Podle umístění ukončujících jednotek v rámci optické přístupové sítě, tedy bodu, kam až vede optické vlákno a kde se pak připojují koncové účastnické sítě, se pak daná síť dělí podle metody “optické vlákno do x” FTTx.

FTTH – vlákno optické přístupové sítě vede až do domu, případně obytného bytu zákazníka. Tedy na trase k zákazníkovi se nepodílí žádné metalické vedení a účastník je připojený přímo k OAN.

FTTB – vlákno je přivedeno k budově. Zde je přítomen rozvaděč, do kterého dále pomocí metalického vedení je připojen koncový účastník. V rámci metalického vedení sítě může být využito už stávajícího vedení. Toto řešení je nejčastější v bytových domech.

FTTO – vlákno je v tomto případě přivedeno do kanceláře, či určitého důležitého uzlu. Takové řešení je nejvhodnější u firem, které vyžadují vysokou přenosovou kapacitu, což naznačuje už samotný název této metody.

FTTC – vlákno je přivedeno do určitého místa, bodu, ze kterého je dále vedeno pomocí metalických, či koaxiálních kabelů až ke koncovým účastníkům. Tato metoda se využívá pro připojení menšího počtu koncových účastníků do 300 metrů od daného bodu. Je vhodná tedy pro sídliště.

FTTCab – jedná se o obdobu metody FTTC. Rozdíl je v tom, že připojení je konstruováno pro větší množství účastníků a větší vzdálenost od přírodního místa, až 1500 metrů. Tuto metodu využívají především telekomunikační a kabelové společnosti pro následné poskytnutí internetového připojení koncových účastníků. [2] [3][5][8]

1.3 Topologické řazení OAN

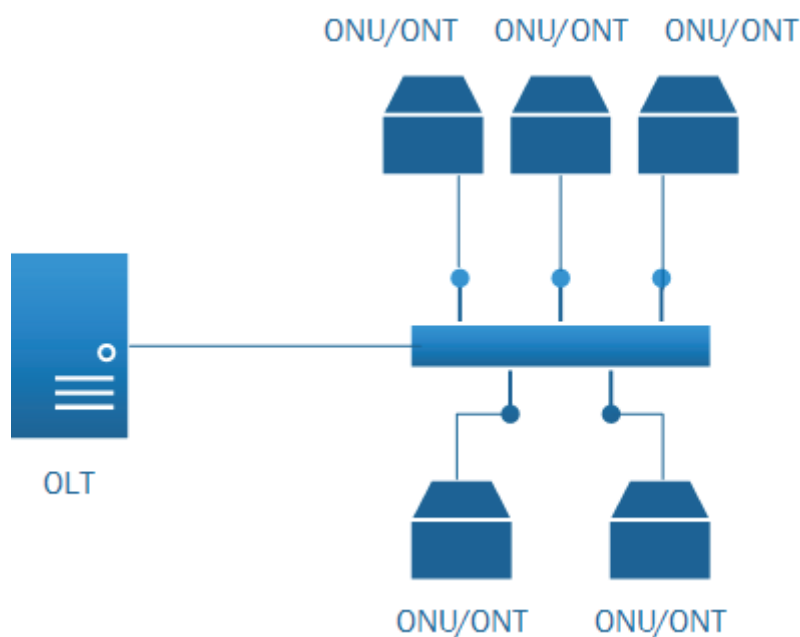
Topologie OAN sítě je dána způsobem, jakým jsou přenášena data mezi ukončujícími jednotkami OLT a ONT. Volba dané topologie závisí na parametrech, jako je vzdálenost daného účastníka od ústředny, respektive místa, kde se nachází OLT jednotka. Tato vzdálenost je také závislá na požadované šířce přenosového pásma. Další faktor je charakter optických komponent, jak již bylo zmíněno, pokud vezmeme v úvahu aktivní a pasivní typ sítě.

Topologie se tedy dělí na dva typy:

- Bod – bod P2P (point to point) přímé spojení OLT a ONT
- Bod – více bodů P2MP například pasivní optická síť

V praxi se pak ovšem využívá zvláště pro přístupové sítě spojení typu P2MP, protože jedna entita ze strany sítě komunikuje s větším množstvím cílových zařízení. K tomuto účelu slouží topologické rozřazení spíše na síti samotné, než na její technologii.

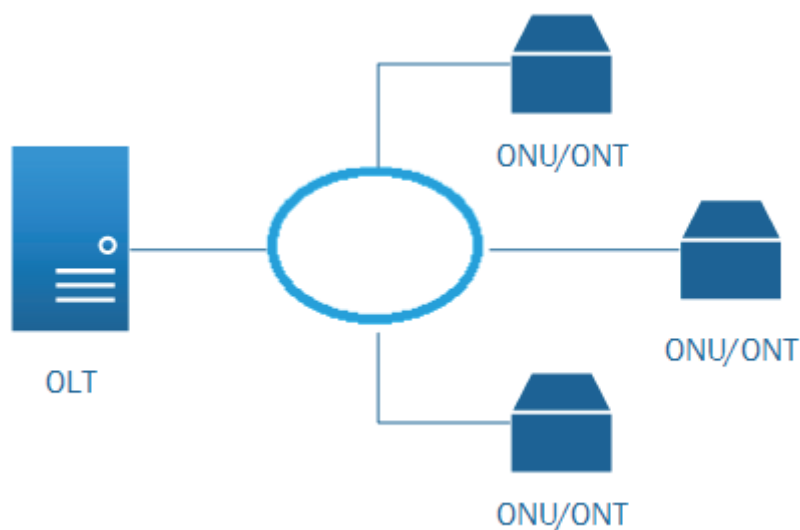
Prvním způsobem takové topologie je zapojení do sběrnice. Toto zapojení sítě disponuje pouze jedním přenosovým médiem, sběrnici, ke které jsou připojeny jednotlivé rozbočovače, představující uzly. ONT a ONU jednotky jsou pak dále připojeny k takovýmto uzlům. Její výhodou je snadné a jednoduché rozšíření. Nicméně čím více rozbočovačů použijeme, tím větší vložný útlum trasa má. Navíc, dojde-li k přerušení trasy kdekoli na sběrnici, dojde k poruše v síti. Tato topologie se využívá pouze pro univerzitní účely.[3][6][8]



Obrázek 1.1: Sběrnice topologie optické sítě

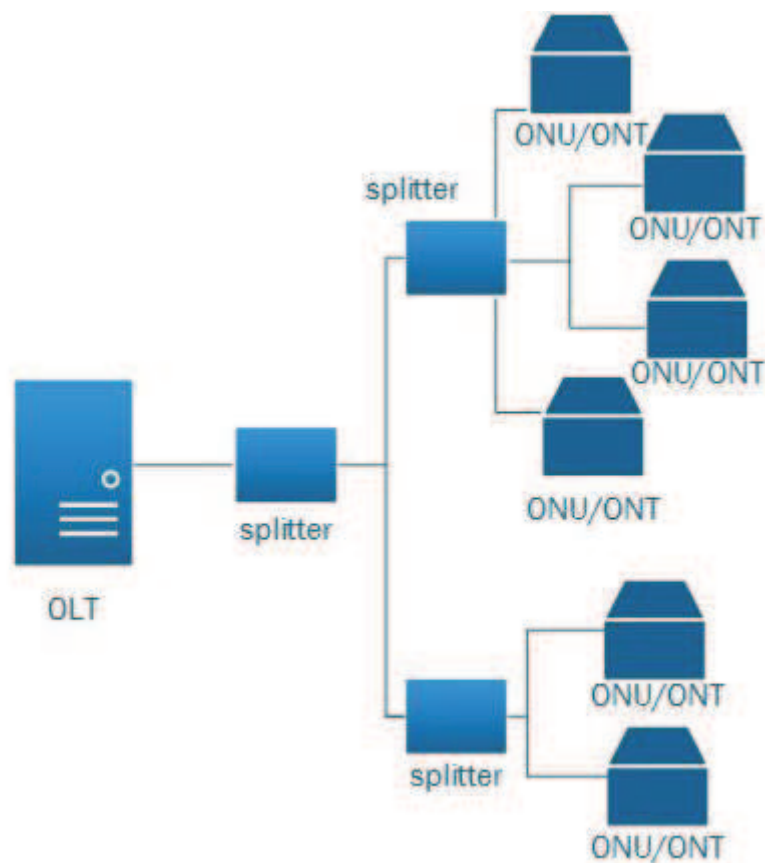
Dalším typem je kruhová topologie. Tento typ zapojení sítě nabízí možnost zálohování s vhodným použitím ONU jednotek. Veškeré zařízení je propojeno v kruhu. Dojde-li k rozpojení v některé části optické cesty, lze dosáhnout k OLT pomocí druhé cesty. Tato topologie se využívá především pro metropolitní síť. Její výhodou je schopnost odolat jedné závadě. Možným vylepšením

je provést dvojí propojení v kruhu pomocí dvou kabelů, čímž dosáhneme redundance a síť je schopna odolat i několika výpadkům najednou. [1][2][3]



Obrázek 1.2: *Kruhová topologie optické sítě*

V současnosti nejvyšší využití v široké škále řešení zapojení optické sítě představuje stromová topologie architektury bod-více bodů. Vychází s hvězdicové topologie, která sestává z centrálního prvku, k němuž jsou připojeny po separátních spojeních jednotlivé koncové jednotky. Toto zapojení představuje nejbezpečnější cestu. V případě výpadku v jedné větvi zůstane zbytek sítě funkční, což například topologie typu sběrnice neumožňuje. Jelikož se jedná o stromovou topologii, tak kořen, tedy centrální prvek stromu, je tvořen OLT jednotkou, větvení zajišťují jednotlivé rozbočovače a listy představují ONT/ONU jednotky. [1][2][3]



Obrázek 1.3: *Stromová topologie optické sítě*

1.4 Aktivní a pasivní OAN

Aktivní optickou sítí OAN rozumíme síť takovou, která ve svém principu využívá aktivních, neboli energeticky závislých komponent, jako jsou odbočnice, jejichž činnost spočívá v tom, že signál jdoucí ze sítě rozděljuje, aby každý koncový účastník dostal pouze signál patřící jemu a skládá pokud účastník posílá data zpět do sítě. V neposlední řadě také tyto sítě obsahují optické zesilovače, díky kterým jsou schopné zesílit signál tlumený vlivem přenosu skrze optické vlákno a tím překlenou větší vzdálenost, než jak je tomu v případě pasivních optických přístupových sítí.

Pasivní optická síť je taková síť, kde je přenos signálu ke koncovým účastníkům proveden pomocí transparentních prvků, což jsou zařízení, která ke svému běhu nepotřebují být napájena energií. Mezi tyto prvky patří optická vlákna, konektory a pasivní odbočnice (splittery). Při zapojení pasivní optické sítě hierarchizujeme spojení mezi OLT a ONT/ONU jako P2MP, a to podle stromové, kruhové, nebo hvězdicové topologie. Každá z topologií má své klady a zápory, a proto se vyplatí uvedené topologie kombinovat.

Signál se skrze síť přenáší buď samostatným optickým vláknem pro každý směr, nebo jediným vláknem pro oba směry, přičemž druhá varianta se využívá častěji. K účelu realizace přenesení takového signálu skrze jedno vlákno se pak využívá vlnově děleného multiplexu WDM. Každý směr využívá záření odlišné vlnové délky. Komunikace pro sestupný směr, tedy od sítě, využívá všesměrového šíření signálu a odbočnice jej distribuují k jednotlivým účastnickým síťovým

jednotkám, které si vyfiltrují signál jim určený. Při komunikaci směrem do sítě od účastníků je všemi jednotkami signál vyslán zároveň a odbočnice se pak stará o to, aby nedocházelo ke kolizím. Využívá se WDMA a TDMA. V případě WDMA se pro každou účastnickou síťovou jednotku využívá jedna vlnová délka signálu, u TDMA každá z jednotek vkládá svá data do jí vyhrazeného časového rámce (time slot), který se pak odesílá směrem k OLT. Pokud se vezme v úvahu rozdílná vzdálenost mezi jednotkami ONT a ONU, může při TDMA metodě docházet ke kolizím, díky různě dlouhé době průchodu dat skrze síť. Tomu se předchází vložení ochranné doby mezi jednotlivé časové rámce, které musí být delší, než maximální rozdíl dob šíření.

Pasivní optické sítě mají množství výhod, jako je úspora optického vlákna při realizaci výstavby sítě, eliminace aktivních prvků v distribuční struktuře. Optické propojení mezi OLT a ONT umožňuje nenákladné zvyšování přenosové kapacity a zavádění nových služeb. Naopak nevýhodou je, že pasivní rozbočovače optický signál rozdělí bez jakýchkoliv dalších úprav, regenerace, či zesílení. Pracují s velkým vložným útlumem. V důsledku jsou pasivní sítě schopné překlenout pouze omezenou vzdálenost, v řádech několika desítek kilometrů.

V praxi se ve většině případů nasazuje pasivní optická síť právě z důvodu jejich vlastností. Z hlediska použití multiplexerů existují dva typy těchto sítí.

Prvním z nich je síť s časově děleným multiplexním systémem TDM-PON. Komunikace je směrem od OLT posílána skrze splittery k jednotlivým koncovým účastníkům s dělenými, přesně danými časovými rámci. Každá ONU jednotka komunikuje pouze ve svém přiděleném časovém rámci. Do této kategorie patří APON, BPON, GPON

Druhým typem je WDM-PON. V tomto případě signály putují směrem od OLT ke koncovým zařízením. Oddělovač, který se stará o distribuci, signál přeposílá ke koncovým účastníkům, jejichž koncové jednotky disponují optickým filtrem, skrze který projde pouze vlnová délka, na kterou je jednotka naladěna. ONU tedy přijímá signál, šířící se přesně tak, jak jej OLT vysílá a ten obsahuje zároveň komunikaci šířící se na jiných vlnových délkách, než je určena dané koncové jednotce. Tento princip se z hlediska bezpečnosti jeví jako nedostatečný. Existuje i varianta, při které se využívá WDM slučovače, který filtruje signál a koncové jednotce posílá signál na vlnové délce, která přísluší pouze jí. Ta pak nemusí být vybavena dodatečným optickým filtrem a tím se celá síť stává bezpečnější a je snadněji škálovatelná. Na druhou stranu WDM slučovače jsou podstatně dražší než splittery a instalace sítě je pak dražší než u konkurenčních technologií.[2][5][7][8]

1.5 Přístupová síť WDM PON

V dnešní době se v praxi vyskytují zejména sítě EPON a GPON. Ty využívají pro současný přístup určitého množství uživatelů časově dělený multiplex TDMA. Pro komunikaci v obou směrech v těchto sítích se uplatňuje vlnového dělení WDD.

Technologie, aplikovaná v těchto sítích, umožňuje přenos většího množství signálů, které jsou od sebe navzájem odlišeny tím, že každý z nich k přenosu využívá jiné vlnové délky. Jedná se o obdobu situace, kdy například používáme různé frekvence rádiových vln k tomu, aby nedošlo k jejich vzájemné interferenci a signály se paralelně nepřenášely skrze jedno médium. Tímto způsobem jsme schopni naplno využít přenosového pásma poskytnutého optickým vláknem.

Sítě WDM-PON jsou sítě, které skrze přenosové médium přenáší několik signálů, které jsou navzájem odděleny vlnovou délkou. Každý signál, který se přenáší, se nazývá kanálem a každý kanál je určen jednomu uživateli. Celková přenosová kapacita sítě je pak dána sumárně pro všechny kanály. Každý kanál má předem určenou šířku přenosového pásma ve kterém vysílá. Jednotlivé druhy oddělení těchto kanálů jsou popsány ve dvou podtypech tohoto druhu optických sítí a označují se DWDM, což je systém s hustým vlnovým dělením a CWDM, s hrubým vlnovým dělením.

Sítě CWDM pracují se signály o vlnových délkách v rozmezí 1270-1610nm s kanálovým odstupem jednotlivých nosných vln 20nm, čímž lze pracovat až s 18 kanály. Šíře jednotlivých kanálů je tím dostatečně velká, což je značnou výhodou pro požadavky, které jsou kladeny na síťové prvky. Každé zařízení totiž pracuje s určitou nepřesností a tolerancí k nepřesnostem, navíc míra, kterou se projevují, je ovlivněna okolní teplotou místa, kde se daný optický síťový prvek nachází. Důležité je, že pokud pracujeme s rozdíly vlnových délek v řádech jednotek nanometrů, je potřeba, aby nepřesnosti zařízení, byly co nejmenší. CWDM nám umožňují použití levnějších, méně kvalitních zařízení k instalaci sítě. Na druhou stranu tyto sítě nevyužívají optické přenosové spektrum v jeho maximálním potenciálu vzhledem ke kvalitě sítě, které lze už dnes s rozvojem technologie dosáhnout.

Sítě DWDM s hustým dělením naopak mají mnohem více kanálů než sítě CWDM a jsou schopny lépe přenosové spektrum využít. Rozestupy mezi jednotlivými kanály jsou podstatně nižší, řádově o desítky nanometrů. Proto jsou schopné přenášet až přes 100 kanálů v jediném vlákne. Tyto sítě mají velkou přenosovou rychlost a jsou budoucností optických přístupových sítí. Avšak nároky na splnění přenosových a síťových požadavků jsou enormní a z těchto důvodů je jejich instalace velmi nákladná. Proto se využívají ve většině případů stále jen k laboratorním účelům. Vzdálenost, kterou jsou tyto pasivní optické sítě schopny překlenout, činí přibližně 20 kilometrů, což je nedostačující, zejména na úrovni OAN. Řešení tohoto problému zde představuje nasazení erbiem dopovaných vláknových optických zesilovačů EDFA. DWDM sítě pracují v rozsahu vlnových délek 1530-1625 nanometrů, což odpovídá C a L pásmu. Rozdělení optického spektra na optické pásma je pak zaznamenáno v tabulce (Tab 1.2). V následující tabulce (Tab 1.1) se nachází srovnání CWDM a DWDM technologií. [1][6][7][8]

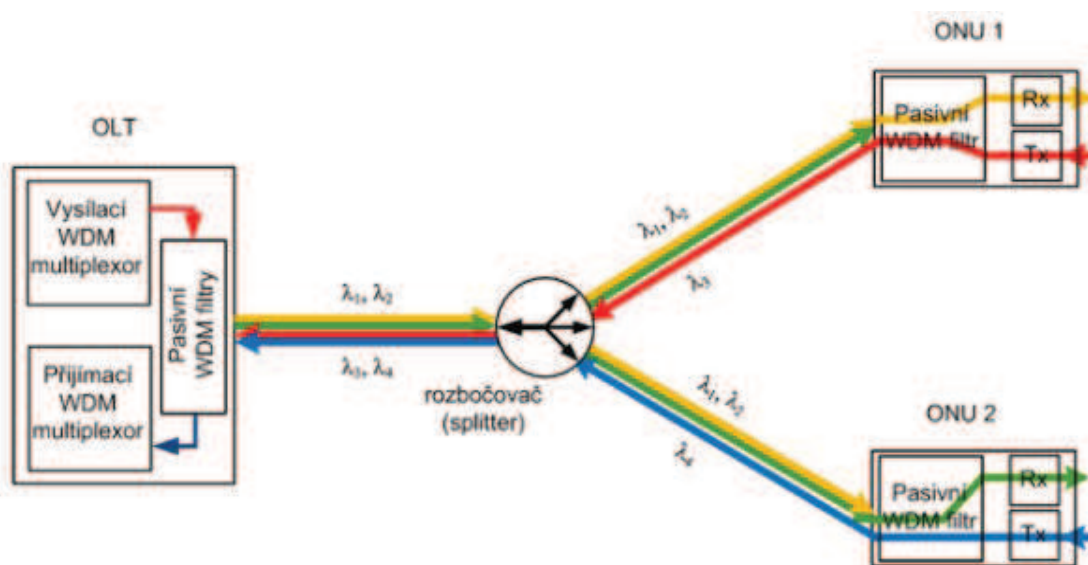
Tabulka 1.1: Porovnání technologií CWDM a DWDM[8]

Aplikace/parametr	CWDM - metropolitní přístup	DWDM-metropolitní síť	DWDM dálkové spoje
Kanály a vlákno	4.16	32-80	80-160
Použité spektrum	pásma O,E,S,C,L	pásma C,L	pásma C,L,S
Vzdálenost mezi kanály	20 nm (2500 Ghz)	0,8 nm (100 Ghz)	0,4 nm (50 Ghz)
Kapacita vlnové délky	1,5 Gbps	10G bps	10-40 Gbps
Kapacita vlákna	20-40 Gbps	100-1000 Gbps	Tbps
Typ laseru	nechlazený DFB (distributed-feedback laser)	chlazený DFB	chlazený DFB
Dosah	do 50-80km	stovky km	tisíce km
Optický zesilovač	žádný	EDFA	EDFA, Raman

1.5.1 Architektura WDM-PON

Nejdůležitější schopností každé sítě je škálovatelnost, tedy její schopnost připojit co nejvíce uživatelů. Jednak je to otázkou schopností samotné sítě, jak je třeba architektonicky síť uspořádat, jaké budou využité prvky a jak bude probíhat komunikace, pak se také jedná o náklady spojené s rozšířením sítě, ty by měly být naopak co nejnižší. Ideální síť je tedy taková síť, která je snadná na instalaci a její rozšíření nestojí žádné další investice. V reálných podmínkách toto není možné. Síť WDM-PON se v tomto ohledu dělí na několik poddruhů.

Prvním řešením je koncept, kde počítá s tím, že každý koncový účastník má pevně danou vlnovou délku. Pasivní rozbočovač pak provede jen rozdělení signálu do všech směrů. Koncové jednoty tak přijmou i signály určené jiným účastníkům. Z hlediska sítě je tedy nutné, aby každá ONU jednotka disponovala filtrem. Například v síti o 16 uživatelích musí tedy být stejné množství optických filtrů. Komunikace v opačném směru, tedy do sítě od účastníka, probíhá reverzně, komunikací bod-bod směrem k slučovači, který multiplexuje signály z jednotlivých větví sítě zpátky do jednoho toku a ten pak přenáší k OLT. Nevýhodou takové sítě je nutnost šifrovat data, aby nemohla být odposlouchávána koncovým účastníkem, kterému nejsou určena. Šifrování pak vyžaduje zapouzdření dat samotných a dodání přídatného množství dat, což vede k plýtvání zdroji sítě, dále se pak velmi snadno může stát, že budou dva uživatelé používat stejnou vlnovou délku, což vede k dalším komunikačním chybám. Na následujícím obrázku je graficky znázorněná komunikace v takové síti.[1][7][8]

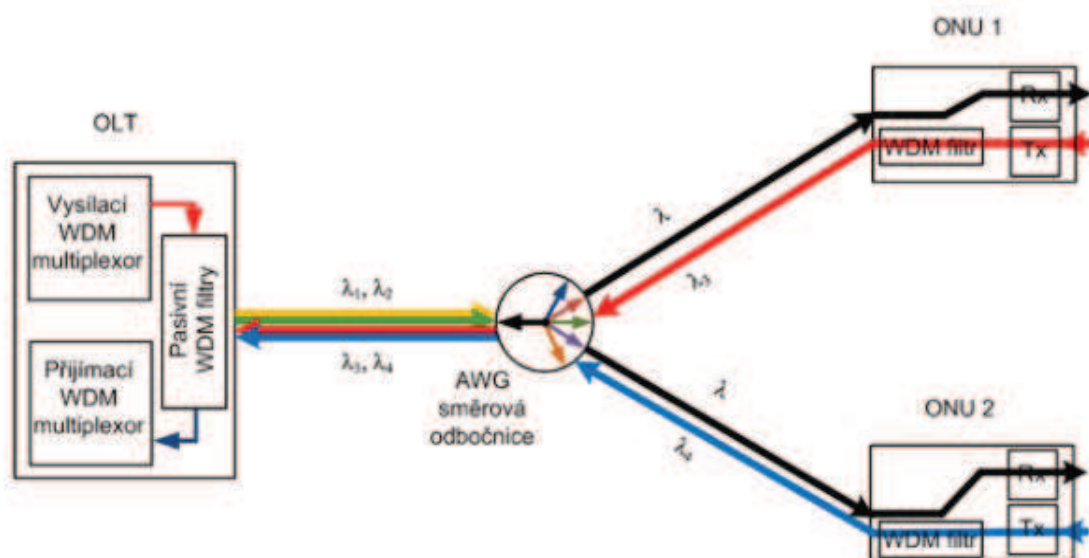


Obrázek 1.4: WDM-PON komunikace pevně stanovené vlnové délky[7]

Druhou metodou je využití WDM slučovače jako je AWG směrová odbočnice. Toto zařízení je schopné provést demultiplexaci signálu jdoucího od OLT a oddělit jednotlivé vlnové délky od sebe, čímž dané koncové jednotce odešle signál patřící pouze jí. ONU jednotky tím pádem nemusí být opatřeny dodatečnými filtry, čímž se sníží množství zařízení potřebných k sestavení sítě, koncové jednotky samotné se stávají konstrukčně jednodušší a není potřeba ani dodatečného šifrování dat. Data

putující směrem do sítě pak AWG seskupuje podobně, jako v předchozím případě. Komunikace na jednotlivých vlnových délkách je pak dále multiplexována do jednoho vlákna a výsledný signál putuje k OLT. Směrová odbočnice AWG má menší útlum, než běžný pasivní oddělovač, nicméně jejich pořizovací cena je oproti tomu o dost vyšší. Následující obrázek zachycuje graficky komunikaci sítě WDM-PON s použitím AWG. Z obrázku je velmi patrné, že jednotliví koncoví účastníci pracují pouze s jedinou vlnovou délkou s absencí optického filtru, což samozřejmě vede také k snížení útlumu. Tento typ sítě je snadno škálovatelný, taková síť patří k vrcholným možnostem dnešní doby a tomu odpovídá i její cena.

Existuje ještě jedna varianta, která je kombinací dvou předešlých, kdy se používá obojí, jak pasivního oddělovače, tak AWG a to tak, že výstup z oddělovače je spojen se vstupem AWG. Větší množství směrových odbočnic umožňuje dosáhnout větší přesnosti v oddělení patřičné vlnové délky koncovým ONU jednotkám. Tato metody se využívá v případě DWDM hustého vlnového multiplexování optické pasivní sítě.[1][7][8]



Obrázek 1.5: WDM-PON komunikace s nasazením AWG [7]

2 Optické zesilovače

Optické zesilovače v optických sítích představují důležitý prvek, který je nepostradatelný v případě, že chceme překonávat velké vzdálenosti, či kompenzovat parazitní jevy, které negativně ovlivňují přenos světla skrze přenosové médium. Optické zesilovače dokážou také rekonstruovat signál přenášený v jádře optického vlákna.

Optické zesilovače jsou zásadním prvkem v rozšířené vláknové telekomunikační síti. Poskytují prostředky k vyrovnání ztráty způsobené vláknem, komponenty a výkonovým dělením na splitterech. Proto umožňují dosáhnout takové globální kapacity sítě, dlouhého přenosového rozpětí, a multipoint-to-multipoint spojení vyžadované pro provoz s rostoucími objemy dat. Při jejich neexistenci by vláknové optické sítě potřebovaly spousty O-E-O převodů pro utlumené a zašuměné oblasti. Důsledkem by byl přenos mnohem menšího množství dat, který by vyžadoval četné množství vláken v každém kabelu. Velké množství kabelů například více členěné budovy, nebo často v drahém centru města, vyžaduje větší zařízení zabírající cenný prostor, vysokou spotřebu výkonu a s tím spojený dopad na životní prostředí a velké náklady na provoz. Z těchto důvodů technologie optických zesilovačů jsou klíčovou cestou k všudypřítomné informační dostupnosti.

Optické zesilovače nabízejí mnoho výhod proti regenerátorům, které představují technicky náročné řešení, výkonově neefektivní a ekonomicky náročné:

- Rychlost přenosu dat systému může být upravena podle požadavků
- Je možné přenášet více kanálů
- Není třeba upravovat stávající přenosové linky, nebo komponenty k dosažení výše zmíněných výhod

Poslední výhoda je obzvlášť důležitá, protože zesilovače musí být schopny plně se adaptovat síti. To umožnilo vznik a technologický vývin takovým sítím, jako jsou DWDM, které dosahují přenosových rychlostí v řádech terabitů za vteřinu.[9][10][11]

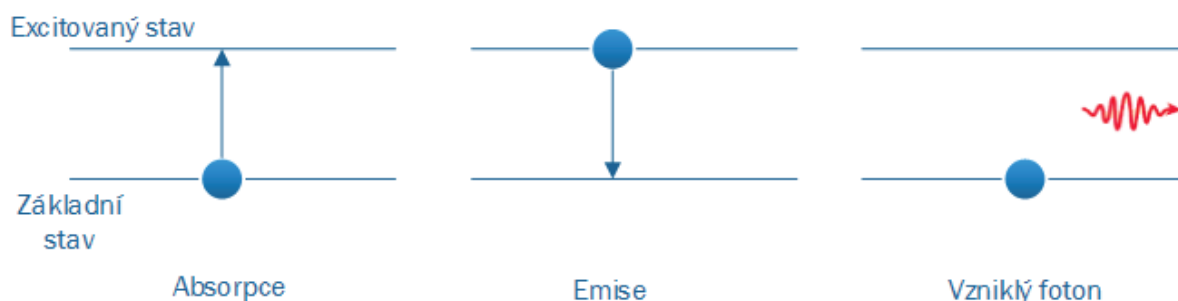
2.1 Princip funkce optického zesilovače

Důležitými pojmy pro pochopení funkce optických zesilovačů jsou spontánní a stimulovaná emise. Jedná se o proces, kterého se využívá k vytvoření fotonu a je popsán pomocí kvantové fyziky. Vznik obou typů emisí je vysvětlen pomocí energetických hladin, které představují orbit oběhu elektronů kolem jádra atomu. Čím dále se elektron od jádra atomu pohybuje, tím vyšší energii má na dané energetické hladině. Čím více energetických hladin máme, tím více je celá situace komplexní a z toho důvodu, pro nejlepší znázornění a pochopení, bude použit dvou hladinový energetický systém.[9][11][10]

2.1.1 Spontánní emise

Před průběhem celého procesu vzniku fotonu pomocí spontánní emise se elektrony nachází v základním stavu. Excitace, tedy vybuzení elektronu na vyšší energetickou hladinu, se dosáhne dodáním energie pomocí světelného záření, elektrického výboje či chemické reakce. V excitovaném stavu elektron setrvá určitou dobu, řádově 10^{-3} až 10^{-7} s a posléze přechází zpátky do stavu základního. Energie, která byla elektronu dodána, se ovšem musí někde vybit a to se provádí rekombinací. Ta je

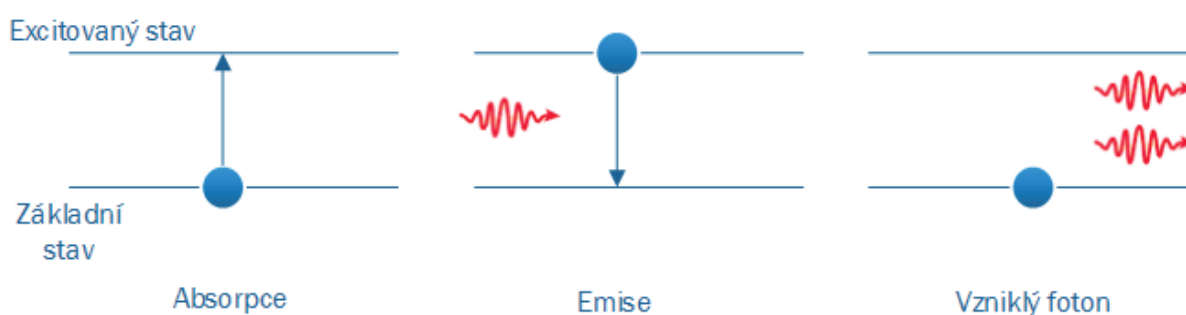
bud' zářivá, nebo nezářivá. V případě zářivé rekombinace dojde ke vzniku fotonu, jehož energie odpovídá rozdílu energetických hladin, mezi kterými přechází. V případě nezářivé rekombinace dojde k uvolnění energie ve formě tepla. [10][11][25]



Obrázek 2.1: *Spontánní emise*

2.1.2 Stimulovaná emise

Tento proces je ve své podstatě stejný jako proces spontánní emise, rozdíl je ovšem v tom, že celý průběh je obohacen o stimulující foton, který strhává elektrony z vyšší energetické hladiny. Tím způsobuje, že tyto elektrony přechází zpátky do základního stavu s tím, že podobně, jako při spontánní emisi, vytvářejí foton. Ovšem nově vzniklý foton má stejné vlastnosti jako foton, který jej vybudil, tedy stejnou vlnovou frekvenci, fázi a směr. Tímto se bavíme o typu záření, které je koherentní. Nutnou podmínkou pro dosažení stimulované emise je inverze populace, což je jev, kdy se větší počet částic nachází v excitovaném stavu, namísto stavu základním. Dá se jednoduše říci, že za normálních podmínek, se částice nachází v základním stavu. Inverzní stav, tedy opačný stav je přesný opak. [10][11] [25]



Obrázek 2.2: *Stimulovaná emise*

2.2 Dělení zesilovačů podle způsobu práce se signálem

Zesilovače dokážou pracovat se signálem dvěma způsoby. První způsob představuje pomalejší, za to úplnou opravu signálu, včetně jeho zesílení, zatímco druhý způsob představuje rychlejší zpracování signálu, ovšem některé vlastnosti postrádá:

- Zesilovače s O-E-O převodem, regenerátory
- Zesilovače bez O-E-O převodu

V prvním případě dochází k převodu optického signálu, který putuje vláknem po optické trase, na signál elektrický. V této podobě se signál zesílí. Proveďte se dále 3R obnova signálu (Re-amplification, Re-timing, Re-shaping). Obnovuje se tedy amplituda, umístění náběžné hrany a tvar optických pulzů. Bohužel, i když by se zdálo, že tento způsob je dokonalý k tomu jej využít, nevýhodou je jeho časová náročnost, dále pak nutnost zařadit do zesilovací soustavy spoustu dalších doplňujících zařízení, které musí být velmi přesné a tudíž drahé.

Optické zesilovače, které pracují bez elektrooptického převodu, jsou svou podstatou schopny signál pouze zesílit bez jeho znovu umístění náběžné hrany a tvaru optických impulzů. Jejich výhodou ovšem je, že umí zesilovat přímo optický signál a tím se celý proces značně urychluje.[9][10][11]

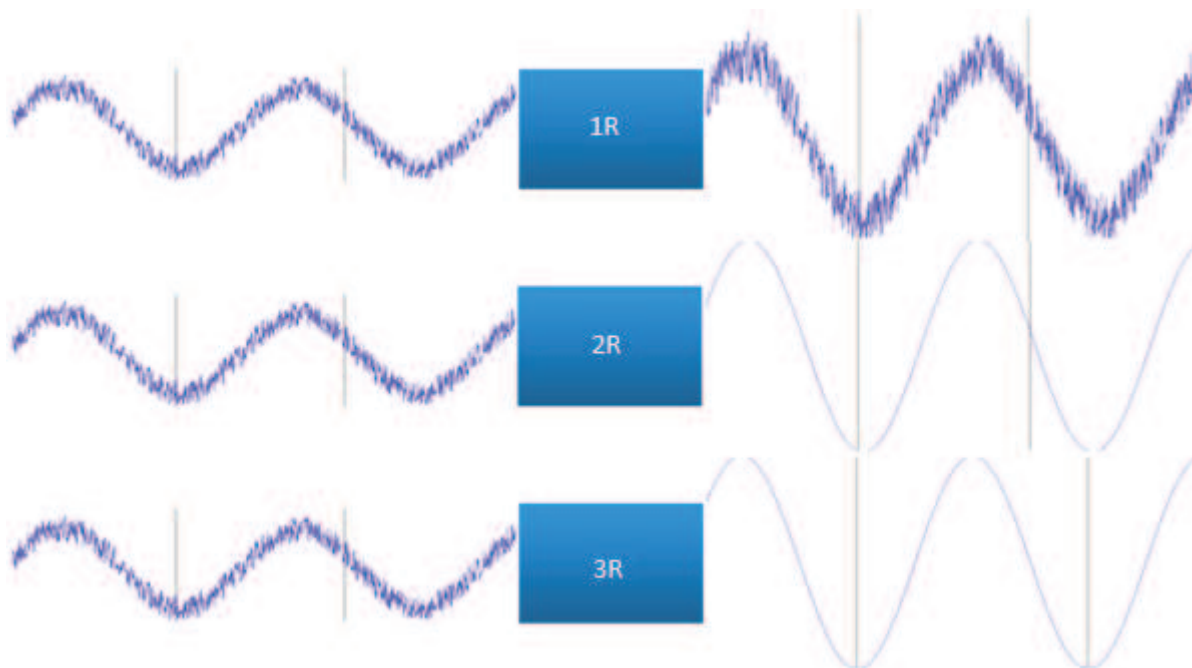
2.2.1 Princip 3R obnovy

Tento model obnovy optického signálu se využívá, jak bylo již zmíněno, u zesilovačů, které jsou schopny optický signál převést zpátky na signál elektrický, posléze jej upravit a zesílit tak, aby bylo možné jej opět vysílat. Nakonec se signál elektrický opět převede na optický a vyšle se dále po optické trase. Tento princip obnovy se dá využít ke kompenzaci disperzí, což jsou negativně ovlivňující jevy, které způsobují roztažení signálu v čase a tím způsobují přeslechy.

Princip 1R obnovy spočívá pouze v obnovení amplitudy signálu. V tomto bodě je práce zesilovače s elektrooptickým převodem a zesilovače bez převodu stejná. Tento princip obnovy je snadno aplikovatelný. V tomto případě je zesilovač schopen pracovat nezávisle na typu signálového kódování, přenosové rychlosti a jiných vlastnostech signálu.

V případě 2R obnovy se signál nejen zesílí, tedy zvětší se jeho amplituda, ale také dochází k obnově jeho původního tvaru před odesláním. V tomto případě se ovšem už neobejdeme bez zesilovače, který provádí elektrooptický převod. Takto opravený signál se posléze opět převede na signál optický a vysílá se dále po trase.

Nakonec při využití zesilovačů s principem 3R obnovy se signál zesílí a upraví, ale také dojde k upravení časování jednotlivých impulzů. Získáme tedy kompletně upravený signál, který se převede z elektrické podoby na optickou a vysílá se dále trasou až ke svému cíli.[9][25]



Obrázek 2.3: *Princip 3R obnovy optického signálu*

2.3 Dělení zesilovačů podle umístění v optické trase

V tomto případě se podíváme na rozdělení optických zesilovačů podle toho, kde jsou umístěny v samotné optické trase. Jedná se tedy o topologický pohled. Zesilovače lze tedy rozmístit na začátek trasy, za vysílací laser, jako výkonový zesilovač. Dále pak jako průběžný zesilovač, neboli (in-line) zesilovač, který umístíme do samotné trasy. Nakonec jako předzesilovač, který umístíme na konec trasy a zesílíme signál jdoucí ze sítě pro samotné přijímací zařízení.

Než umístíme zesilovač do trasy, je tedy nutné dobře zvážit, kde konkrétně bude umístěn, čímž klademe rozdílné požadavky na různé parametry samotných zesilovačů a ty se projevují patřičným ovlivněním vstupního signálu.[11][12][13]

2.3.1 Výkonový zesilovač

Účelem takového typu zesilovače je zesílit signál ještě před samotnou cestou přes optickou trasu až k přijímači. Sítě tohoto typu jsou schopny překlenout větší vzdálenosti a jsou zároveň spolehlivé, protože nikde na trase není umístěn žádný aktivní prvek. Díky tomu, že zesilují signál jdoucí přímo ze zdroje záření, musí být schopné pojmout velký vstupní výkon, také musí vyzařovat velký výstupní výkon. Tento parametr se označuje jako saturační výkon, což je hranice, kdy je zesilovač daný vstupní výkon stále schopen pojmout a kdy ne. Pokud budeme chtít zesílit větší množství signálu, které mají rozdílné vlnové délky, například v sítích využívajících WDM dělení, je nutné využít právě tento typ zesilovače.[12][13]

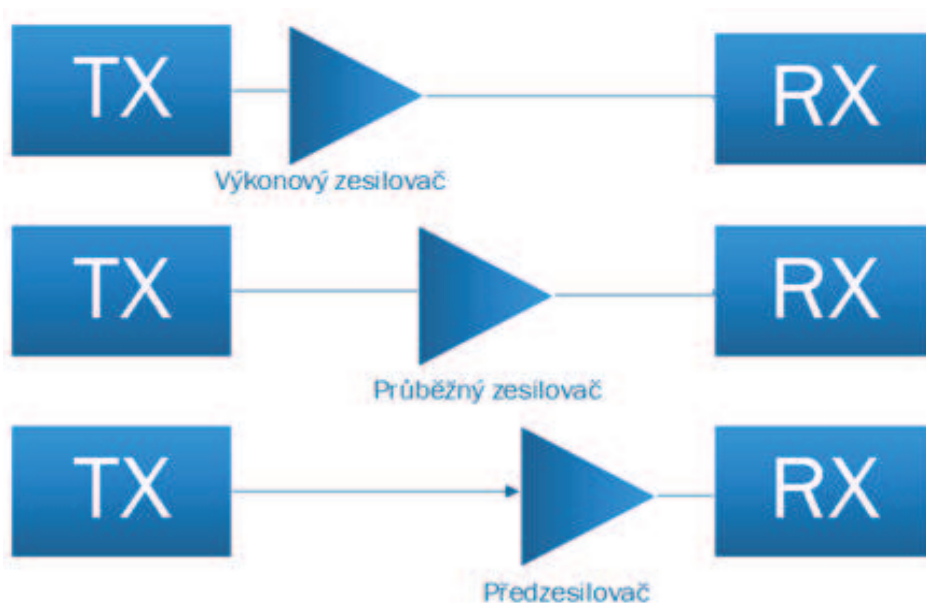
2.3.2 Průběžný zesilovač

Tento typ zesilovače se umístí do trasy. Účelem takového zesilovače je zesílit slabý vstupní signál na silný výstupní signál. Důležitým parametrem je schopnost zesílit signál na co nejvyšší úroveň s co nejmenším množstvím šumu. Průběžné zesilovače jsou ovšem závislé na daném druhu

použité modulace a také na přenosové rychlosti. V případě použití polovodičového zesilovače pro takový účel, lze využít jeho schopnost obousměrného přenosu, nízké spotřeby a kompaktních rozměrů. Používá se ke kompenzování útlumu způsobeného trasou, žádoucími parametry je velký zisk a saturační výkon. [9][10][11]

2.3.3 Předzesilovač

Tento zesilovač se využívá pro zesílení signálu, který je na konci trasy a následně bude zpracován přijímačem. Jeho účelem je zajistit, aby úroveň signálu pro logickou hodnotu jedna, byla vyšší, než je prahová hodnota úrovně signálu, kterou je schopen přijímač detekovat. Zároveň tím, že zvýší hodnotu výkonu, dopadajícího na přijímač, zlepšuje odstup signálu od šumu. Poměr odstupů je pak vyjádřen parametrem SNR. Důležitými vlastnostmi těchto zesilovačů jsou velký zisk a nízká hodnota šumového čísla SNR.[9][10]



Obrázek 2.4: Dělení zesilovačů podle umístění v optické trase

2.4 Parametry zesilovačů

- Zisk G-tato hodnota se vyjadřuje nejčastěji v logaritmickém měřítku a udává, o kolik se výstupní signál zesílil oproti vstupnímu signálu; je to tedy jejich poměr.
- Saturace zisku je moment, kdy ačkoliv budeme čerpat ze zdroje energie stále větší množství, tak se zisk signálu nezmění. Popisuje tedy energetickou účinnost zesilovače.
- Vložený útlum a útlum zesilovače. Zesilovač, který odpojíme od zdroje, bude zdrojem určitého množství útlumu. Snahou je, aby tento útlum byl co nejmenší.
- Šířka pásma - je rozsah vlnových délek, které zesilovač dokáže zesílit. Jinými slovy tento parametr říká, jak moc je vhodný zesilovač pro danou síť. Pokud nedokáže zesílit nosný signál o určité vlnové délce, stane se nevhodným a je třeba jej nahradit, nebo modifikovat.

- Teplotní stabilita. Tento faktor je důležitý zejména u systému s hustým vlnovým dělením, kde by změna vlnové délky, způsobená teplotní nestabilitou, narušila sousední kanály.
- Faktor SNR - jedná se o poměr odstupů od šumu mezi vstupním a výstupním signálem. Udává se v logaritmickém měřítku a je důležitým parametrem pro detekci signálů s malým výkonem.

Ideální optický zesilovač by měl mít vysoký zisk, žádný vložený útlum, měl by být transparentní, tj. nezávislý na vlastnostech vstupního signálu, měl by vykazovat nulový SNR faktor a měl by být schopen zesilovat kteroukoliv vlnovou délku v celém spektru.[9][11][12]

3 Typy optických zesilovačů

Optické zesilovače, které nám umožní přenést signál na větší vzdálenosti, představují nedílnou součást optických systémů. Aby byl signál zesílen, je nutné dodat mu určitým způsobem energii, ta je dodávána vnějším zdrojem. Důležité je u optických zesilovačů to, aby zesílení optického signálu probíhalo bez nutnosti převodu optického signálu na signál elektrický. Prvním z několika typů optických zesilovačů jsou polovodičové zesilovače SOA. Těmto zesilovačům je energie dodávána pomocí elektrického proudu a jsou podobné svou činností laserům. Dalším typem jsou vláknové zesilovače xDFA. Tyto zesilovače pro svůj účel používají speciální typy optických vláken s příměsemi. Posledním typem jsou zesilovače, které pracují na principu Ramanova rozptylu.

Jednotlivé druhy zesilovačů mají různé vlastnosti, podle kterých se různí jejich nasazení v optických sítích tak, aby se využilo jejich maximálního potenciálu. Typickými vlastnostmi zesilovačů jsou například zisk, vstupní saturační výkon, saturace zisku, vložný útlum, šířka pásma zesilovače, šumové číslo, nebo teplotní stabilita.

3.1 Polovodičové zesilovače

Pokroky v oblasti polovodičových materiálů v zesilovačích postupně způsobily, že se zesilovače začaly využívat ve stále větším měřítku v mnoha různých aplikacích. Z tohoto důvodu se dnes využívají k zesílení optického signálu jdoucího po optické trase a ke konverzi vlnové délky.

Polovodičové zesilovače pracují podobně jako ostatní typy zesilovačů na principu stimulované emise záření světla. Energie se jim dodává ve formě elektrické energie. Jsou snadno integrovatelné a mají malé rozměry. Jsou velmi podobné polovodičovému laseru. Zesilovaný signál se přivede na vstup zesilovače, který signál zesílí a následně skrze výstup přivede signál zpět do vlákna. Vázání světla z a do vlákna se zajišťuje optickými vazebními členy. Zesílení optického signálu tedy neprobíhá přímo ve vlákne, kterým je veden k přijímači. Vlastnosti polovodičových optických zesilovačů jsou závislé na materiálu, ze kterého jsou vyrobeny. Nejčastěji se používají indium, galium, arzen, fosfor a hliník. Důvodem je jejich velká kvantová účinnost. Zisk zesilovače roste s délkou zesilovače samotného, nicméně je omezený jeho saturací z toho důvodu, že hustota nosičů náboje v aktivní oblasti závisí na vstupní intenzitě. Pokud by intenzita vstupního signálu, který má být zesílen, byla moc vysoká, tak se v aktivní oblasti nebude nacházet dostatek nosičů, a proto nebude dosažena požadovaná úroveň stimulované emise a tím nenastává zesílení odpovídající dané intenzitě.

V principu čerpací napětí přes elektrody dostává elektrony z valenčního pásu do excitované hladiny. Elektrony překonávají zakázaný pás a dostávají se do pásu vodivostního. Jedná se o vyšší energetickou hladinu. Pokud se větší množství elektronů nachází ve stavu excitovaném, nežli ve stavu základním, vzniká inverze populace, tedy obrácené obsazení elektronů v energetických hladinách, než je tomu za normálních podmínek. V tento okamžik je aktivní prostředí připraveno k samotnému zesílení. To probíhá na principu stimulované emise. Tedy fotony zesilovaného záření strhují elektrony ve vyšších energetických hladinách, ty se vracejí zpátky do základní hladiny, do valenčního pásu a uvolňují svou energii ve formě nově vzniklého fotonu, který má stejnou frekvenci, fázi a polarizaci jako stimulující foton. Nevýhodou je, že kromě zesíleného signálu se na výstupu zesilovače přidává šum zesílený spontánní emisí ASE.

Polovodičové zesilovače mají také potenciál k tomu, aby se z nich dalo vytvořit měřicí zařízení. Změna hustoty nosičů náboje, indukovaná vstupním signálem, způsobuje vznik nelinearity, které pak způsobují frekvenční zvlnění, křížově modulované jevy. Tyto nelinearity lze využít a na základě jejich změny sestavit konvertor vlnové délky. Nejčastěji se vyskytují jevy jako je křížová zesilovací modulace XGM, křížová fázová modulace XPM a čtyřvlonné směšování.

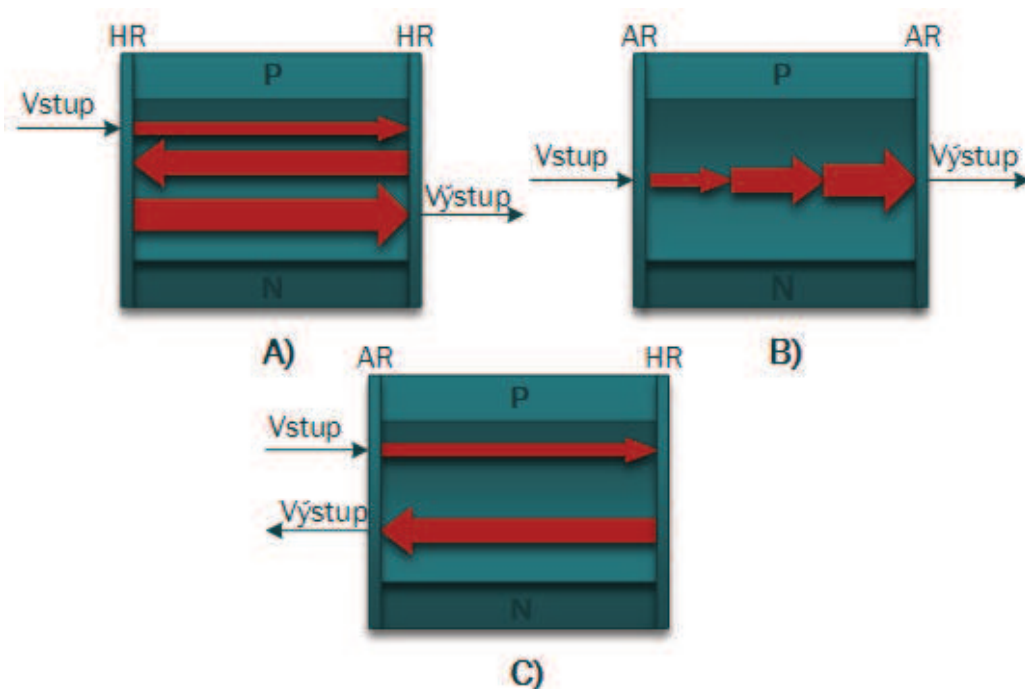
Jako ostatní polovodičové prvky, jsou zesilovače umístěny v pouzdře. To zajišťuje teplotní stabilitu, regulaci pracovní vlnové délky a maximální možné zesílení. Čím více je nosičů náboje v aktivní oblasti, v přechodu PN, tím vyšší index lomu získáme. Aktivní oblast je chráněna pláštěm.

Zesilovače SOA lze rozdělit na Fabry-Perot zesilovače FP-SOA a průchozí TW-SOA. V případě použití FP zesilovačů je dosažené zesílení větší, z důvodu použití odrazných ploch, které jsou na vstupu a výstupu zesilovače. Jejich účelem je odrazit světelný signál, který tak opakovaně prochází skrz aktivní oblast a rezonuje, čímž se zesílení několikanásobně zvýší. Naopak nevýhodou je, že tyto zesilovače nemají rovnoměrné zesílení napříč spektrem vlnových délek.

Zesilovače TW-SOA mají naopak menší, zato rovnoměrné zesílení. Signál u tohoto typu SOA zesilovače prochází aktivní oblastí pouze jedenkrát a vstup i výstup dutiny zesilovače je opatřen antireflexní vrstvou, která má odrazivost menší než 0,001%. Zesilovač, který využívá antireflexní vrstvy, není tak citlivý na kolísání řídicího proudu, teplotu a polarizaci zesilovaného signálu. Čelní antireflexní plocha je dále šikmá, což zabraňuje zpětným odrazům. Zesilovač typu TW-SOA je vhodné využít v optických systémech díky malé proměnlivosti zesílení.

Dalším typem polovodičového zesilovače je RSOA, který má na jednom konci vysoce odrazivou plochu, jak je tomu v případě FP-SOA, ale na konci druhém má plochu antireflexní. Zesilovač pracuje tak, že první strana, vstupní a výstupní port, jsou opatřeny antireflexní plochou, zatímco strana druhá, reflexní plochou, která slouží k odrazení signálu zpátky. Tento typ zesilovače je svou strukturou vhodný pro nasazení v optických systémech pracujících na vlnovém dělení signálů.

[9][10][11][15][25]



Obrázek 3.1: *Princip polovodičových zesilovačů A) FP-SOA B) TW-SOA C) RSOA*

3.2 Ramanův zesilovač

Podstatou tohoto typu optického zesilovače je vzájemná interakce prostředí s fotony, které se v něm šíří. Základ tvoří Ramanův rozptyl, který je za účelem zesílení stimulován. Výsledkem je posuv pracovní vlnové délky optického záření. Aktivní prostředí je tvořeno optickým vláknem, které je vyrobeno z oxidu křemičitého, signál lze tedy zesilovat přímo ve vlastním přenosovém optickém vlákně. Za účelem zvýšení účinku takového zesilovače, můžeme využít vlákna, která jsou dopována Germániem. Vstupní signál se zesiluje při průchodu ve směru, či proti směru šíření paprsku čerpacího laseru. [11][14]

3.2.1 Princip zesílení

Ramanovy zesilovače tedy fungují na principu Ramanova rozptylu. Pokud dopadá elektromagnetické, tedy světelné záření na molekuly materiálu optického vlákna, ve kterém je šířen signál, dochází k rozptylu tohoto záření. Z většiny se jedná o Reiligho rozptyl, tedy rozptýlené záření má stejnou energii a vlnovou délku, jako záření před rozptýlením. Pouze malá část záření, dopadajícího na molekuly materiálu vlákna, je absorbována a následně emitována s větší vlnovou délkou, než mělo záření před rozptylem. Foton takového záření vybudí molekulu materiálu s kterým interaguje na virtuální hladinu. Přechodem zpátky do původní hladiny dochází k uvolnění energie ve formě signálového fotonu. Energetický rozdíl mezi signálovým fotonem a fotonem světelného záření, které slouží k dodání energie, je rozptýlen vibracemi molekul hostitelského materiálu. Úrovně vibrací pak určují frekvenční rozdíl, posuv mezi čerpacím a signálovým světelným tokem. Takovému posuvu se říká Stokesův. Tedy záření, které slouží pro čerpání energie, vybudí materiál optického vlákna, způsobí Ramanův rozptyl a tím dochází k přelévání energie do signálového záření. Čerpací záření může být do vlákna dodáváno jak ve směru se signálovým paprskem, tak ve směru opačném.

Pokud bude mít čerpací zdroj dostatečně velký výkon, dojde ke zvýšení Ramanova rozptylu a většina energie záření bude rozptýlena. Tento jev se nazývá stimulovaný Ramanův rozptyl. Výhodou SRS je to, že jej lze vyvolat s vhodně zvoleným zdrojem záření a vlnovou délkou zdroje záření na jakékoli signálové vlnové délce a není potřeba k tomu účelu nijak zvlášť upravené optické vlákno.

Čerpací zdroje optického záření musí být vysoko výkonové, aby dokázaly dodávat záření o nižší vlnové délce, než je signálové záření. Hodnota signálového posuvu vlnové délky je standardně sto nanometrů. K tomuto účelu se využívají polovodičové diodové lasery.

Míra zesílení Ramanova zesilovače je závislá především na výkonu a vlnové délce čerpacího zdroje, dále na spektrální účinnosti, délce vlákna a velikosti vidové plochy. Jádra s malou efektivní vidovou plochou jsou nejvhodnější pro generování zisku. Používají se také speciální typy vláken pro kompenzaci disperze DCF v kombinaci s jednovidovými vlákny SI, tedy vlákna se skokovou změnou indexu lomu.

Ramanův zesilovač je schopen pracovat namnoha vlnových délkách, což jiné typy zesilovačů nedokáže. Výkon je limitován koncentrací fotonů ve vibrujícím stavu a ta je závislá na teplotě zesilovače. Tyto zesilovače tedy pracují na místech s dobrou teplotní stabilizací. Ramanovy zesilovače mají nejmenší šum ze všech typů optických zesilovačů.[10][11][14]

3.2.2 Dělení Ramanových zesilovačů

To, jakým způsobem bude zesilovač v trase připojen, je dáno režimem jeho práce. Jedná se o režim rozprostřený DRA a diskretní režim LRA.

V případě DRA dochází k zesílení signálu po celé délce trasy v rozpětí až čtyř desítek kilometrů. Zdroj záření je umístěn na opačné straně trasy. Tento režim dokáže kompenzovat ztráty výkonu signálu jdoucím vláknem. Vyznačují se větším ziskem a malým nelineárním zkreslením. Z druhé strany, počet pracovních vlnových délek, které mohou signály mít, aby byly úspěšně zesíleny, je omezený. Zesilovače v tomto režimu mají lepší odstup signálu od šumu SNR.

Zesilovače v pracovním režimu LRA poskytují možnost generovat zisk vlnové délce, kterou by nedokázaly zesílit jiné typy zesilovačů. Tento typ zesilovače je tvořen jedním celým blokem a umístí se na určitém místě v trase. To, jak bude zesilovač sestaven, závisí na požadované šířce pásma. Délka těchto zesilovačů je do pěti kilometrů. [10][12][14]

3.3 Optické zesilovače s vláknovou dotací

Tento typ optických zesilovačů pracuje se speciálně upravenými optickými vlákny, přes které cestuje optický signál. Jeho předností je vysoký zisk a odstup signálu od šumu. Díky tomuto zesilovači došlo k masivnímu rozvoji optických systémů WDM a DWDM.

3.3.1 Princip funkce

Jako všechny ostatní typy zesilovačů i tento pracuje na principu stimulované emise. Jeho podstatou jsou ovšem optická vlákna, která jsou dopována již při samotné výrobě příměsí prvků vzácných zemin za účelem zesílení. Jejich koncentrace se pohybuje v řádech od jednotek až po stovky atomů ku milionu molekul materiálu optického vlákna. Vše pak funguje tak, že při dodávání energie pumpou, atomy prvků vzácných zemin energii absorbují a přejdou do vyšších energetických stavů.

Z důvodu inverzní populace, pak následně signálový stimulující foton způsobí emisi, vlivem zpětného přechodu do základního stavu a vzniká nový foton, se stejnými vlastnostmi, jako foton signálu. To, v jakém spektrálním rozsahu zesilovač pracuje, je dáno typem dopovaného prvku. Nejčastěji se k tomuto účelu využívají Erbium, Ytterbium, Thulium, nebo Neodymium.

Vstupní signál do zesilovače tedy nejdříve prochází optickým izolátorem, ten zamezuje zpětným odrazům, které by mohly způsobit optickému zdroji rozladění. Následuje filtrace signálu. Ta blokuje signály, které by mohly být na stejné vlnové délce, jako dopovací záření. Poté optický signál putuje přes dopované vlákno, které je vybuzeno zářením pumpy, přivedeným do vlákna pomocí spojovače a dojde k zesílení signálu, který putuje vláknem. Po zesílení prochází signál opět izolátorem, čímž se zamezuje pumpovanému světlu, aby se šířilo dále trasou a celý proces je u konce. Signál už pak dále putuje směrem k přijímači.

Typ dopovaného prvku vzácné zeminy v tomto procesu určuje, pro jaké spektrum vlnových délek bude zesilovač schopen signál zesílit. Podle pracovní vlnové délky se tedy volí typ dopovacího prvku. Výhodou optických vláknových zesilovačů je schopnost zesílit signál složený z většího množství vlnových délek, pokud patří do specifického spektra. Nejrozšířenějším a nejpoužívanějším typem optických zesilovačů s vláknovou dotací je zesilovač EDFA, který je dopovaný erbiem.

Následující tabulka obsahuje informace o několika typech dopovacích prvků použitých v zesilovačích a jejich zastoupení v optickém spektru vlnových délek. Jsou zde zastoupeny zesilovače PDFFA, tedy Praseodymiem dopovaný zesilovač, TDFA Thuliem dopovaný, klasický EDFA zesilovač, EDWA Erbiem dopovaný vlnový zesilovač, ETDFA, což je upravený, erbiem dopovaný zesilovač, postavený na Telluridu za účelem získání větší šíře optického spektra. Posledním zástupcem je GS-EDFA, což je opět Erbiem dopovaný zesilovač, který pracuje v L pásmu. [11][12][16]

Tabulka 1.2: *Typy optických vláknových zesilovačů vyobrazeny v optickém spektru[25]*

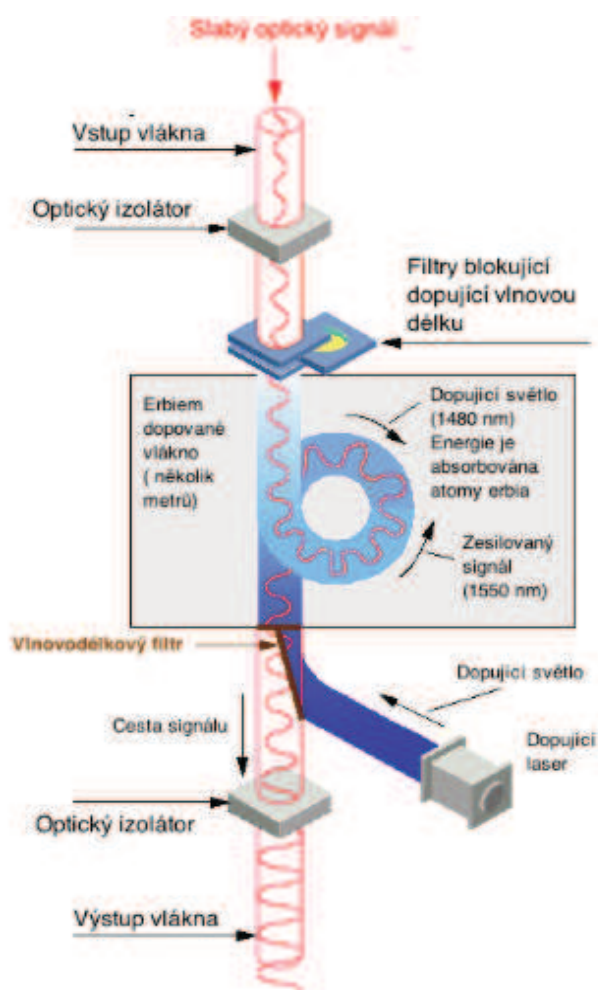
Tabulka 1.2: Typy optických vlnnových zesilovačů zobrazených v optickém spektru [25]							
Optické pásmo	O	E	S	C	L	U	
Vlnová délka [nm]	1260-1360	1360-1460	1460-1530	1530-1565	1565-1625	1625-1675	
Typ zesilovače a jeho zastoupení v optickém spektru vlnových délek	PDFFA		TDFA	EDFA			
				EDWA			
				ETDFA			
				GS-EDFA			

3.4 Optické vláknové zesilovače EDFA

Díky vývoji systémů s optickým vlnovým dělením, je schopnost šířit signál o více vlnových délkách, předpokladem k zvýšení přenosové kapacity. Jednoduše jde tedy o to zvýšit počet vlnových délek, kterými se bude přenášet signál skrz optické vlákno. Aby se jednotlivé vidy nerušily, mají každý rozdílnou vlnovou délku. Právě tato schopnost je využívána pro WDM systémy. Pro zesílení takového signálu by ovšem bylo potřeba mít pro každou vlnovou délku jeden zesilovač, což by bylo nákladné. Proto právě optické zesilovače a zejména tento typ zesilovače, způsobil obrovský pokrok ve vývoji optických systémů, založených na vlnovém dělení. Atomy erbia, které se dopují do vlákna při jeho výrobě, jsou z důvodu svých optických vlastností schopny pracovat v rozsahu vlnových délek od 1530 – 1625nm.

3.4.1 Princip činnosti EDFA

EDFA zesilovač obecně pracuje na principu stimulované emise. V tomto případě pro excitaci atomů erbia, jejichž počet se může lišit v závislosti na dotaci, se dodává světelné záření pumpy v oblasti buď 980 a nebo 1480nm. Pumpování na obrázku je prováděno v opačném směru trasy a do zesilovacího vlákna je přivedeno pomocí spojovače WDM. Vláknem lze ale také pumpovat v druhém směru, či oběma směry zároveň. Na základě dodaného záření, inverze populace a stimulované emise dojde k zesílení vstupního signálu, který musí být v C, případně L pásmu a je přiveden do zesilovacího vlákna přes optický izolátor. Zesílený signál pak putuje dál po trase směrem k přijímači, ovšem v průběhu zesílení se k němu přidá ASE šum, způsobený zesílenou náhodnou emisí.

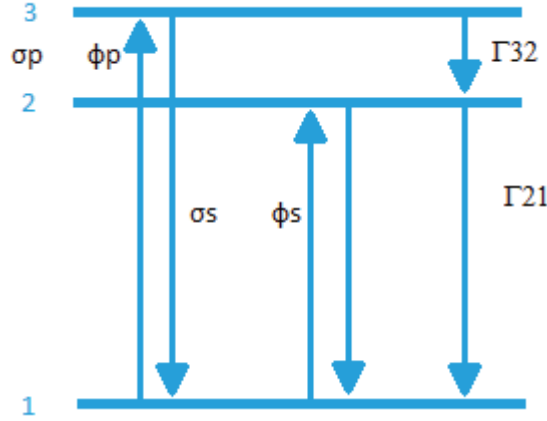


Obrázek 3.2: Schéma optického vláknového EDFA zesilovače[25]

3.4.2 Tříúrovňový energetický systém EDFA

Slabý optický signál je přiveden do zesilovacího vlákna EDFA zesilovače, které je dopováno pumpou na vlnové délce 980nm excitované na vyšší energetickou hladinu. Pumpovací záření na této vlnové délce má vyšší frekvenci a vyšší energii než záření s délkou vln 1480nm. Proto excitované elektrony přechází do energetické hladiny, která není metastabilní, jinými slovy, nelze z ní přejít okamžitě zpátky do základní hladiny. Lze se na ni dívat jako na přechodnou. Vybuzené elektrony zde setrvávají velmi krátký okamžik a následně sestupují do metastabilní hladiny. Při sestupu vyzařují svou

přebytečnou energii nejčastěji ve formě tepla. Pak se již nachází na metastabilní hladině, na které je nutné zajistit inverzi populace, a pak dále pomocí stimulované emise elektrony přechází již do základní hladiny a uvolňují svou energii ve formě fotonu. [10][11][16][17]



Obrázek 3.3: *Tří úrovnňový energetický systém*[17]

Počet elektronů, nacházejících se na jednotlivých hladinách, se označuje jako hodnota populace N_1 , N_2 , N_3 . Dále pak se označují přechody mezi hladinami 32 a 21, tedy přechod z nejvyšší energetické hladiny $3 \rightarrow 2$ a z $2 \rightarrow 1$. Absorpce, způsobená přechodem elektronů mezi stavy 1 a 3 se značí jako σ_p a mezi 1 a 2 jako σ_s . Intenzita dopadajícího světla na frekvenci, která odpovídá přechodu mezi hladinami 1 a 3, je značena jako Φ_p a odpovídá pumpě. Intenzita dopadajícího světla na frekvenci, která odpovídá přechodu mezi hladinami 1 a 2 je označena jako Φ_s a odpovídá signálu, přičemž v obou případech frekvence představuje množství fotonů prošlých za jednotku času, jednotkou plochy. Změna populace pro každou úroveň, vyplývá z absorpce fotonů dopadajícího světla pro spontánní i stimulovanou emisi. Na procesu zesílení se tedy podílí tří hladinový model reprezentující strukturu energetických úrovní Er^{3+} . Díky těmto konvencím jsou stanoveny rovnice pro změnu populace napříč všemi třemi hladinami:[16][17]

$$\frac{dN_3}{dt} = -I_{32}N_3 + (N_1 - N_3)\Phi_p\sigma_p \quad (3.1)$$

$$\frac{dN_2}{dt} = -I_{21}N_2 + I_{32}N_3 - (N_2 - N_1)\Phi_s\sigma_s \quad (3.2)$$

$$\frac{dN_1}{dt} = -I_{21}N_2 - (N_1 - N_3)\Phi_p\sigma_p - (N_2 - N_1)\Phi_s\sigma_s \quad (3.3)$$

V ustáleném, klidovém stavu, by měla být populace na jednotlivých úrovních rovna nule. Celková hodnota populace je dále dána součtem populací na všech jednotlivých úrovních. Pomocí matematických úprav rovnice (3.1) jsme pak dále schopni napsat populační rovnici na hladině 3 jako:

$$N_3 = \frac{1}{1 + \frac{I_{32}}{\Phi_p\sigma_p}} N_1 \quad (3.4)$$

Z takto upravené rovnice lze vidět, že pokud množství přechodů mezi hladinami 3 a 2 I_{32} má vysokou hodnotu v porovnání s absorpčním přechodem elektronů pumpy σ_p a intenzity dopadajícího světla z pumpy Φ_p na hladině 3, tak hodnota populace N_3 se blíží k nule. Většina populace elektronů se

tedy nachází na hladinách 1 a 2. Toho se využívá, pokud hovoříme o dvou hladinovém energetickém systému.

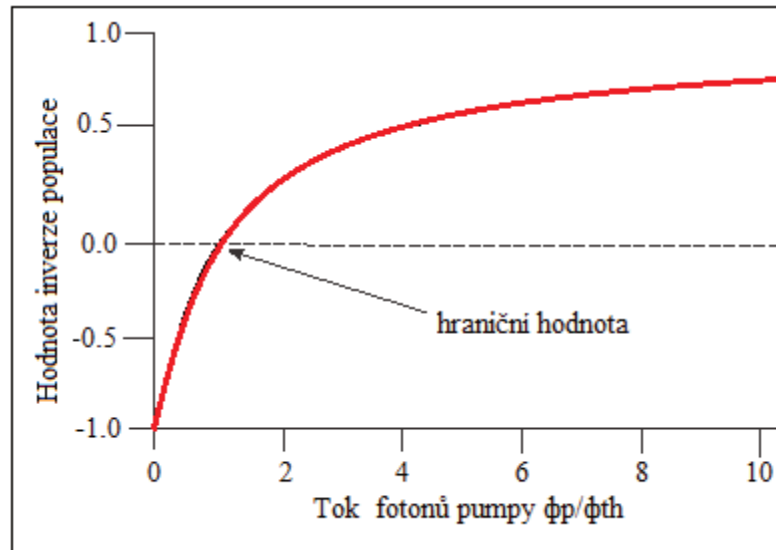
Dále se zavádí hodnota τ_2 , neboli časová životnost druhé energetické hladiny a platí že I_{21} je převrácená hodnota τ_2 . Podmínka, pro inverzní populaci na 2. hladině, tedy i pro samotný zisk zesilovače říká, že populace $N_2 \geq N_1$. Prahová hodnota odpovídá vzájemné rovnosti populací na hladině 1 a 2, což odpovídá rovnici intenzity pumpy: [15][16]

$$\Phi_{th} = \frac{I_{21}}{\sigma_p} = \frac{1}{\tau_2 \sigma_p} \quad (3.5)$$

Naopak v situaci, kdy má signál malou intenzitu a počet přechodů mezi hladinami 3 a 2 I_{32} je velký v porovnání s přenosovým poměrem světla pumpy σ_p a Φ_p , tak lze populační inverzi zapsat následovně:

$$\frac{N_2 - N_1}{N} = \frac{\Phi_p' - 1}{\Phi_p' + 1} \quad (3.6)$$

Takto upravená rovnice populační inverze se pak využívá k vykreslení grafu. Pod prahovou hodnotou jsou záporné hodnoty inverze populace a nad prahovou hodnotou kladné. Pokud je hodnota inverze populace záporná, zesilovač má záporný zisk a absorpční přechody se projeví více než emisní. Kladná hodnota inverze populace pak kontrastně způsobuje kladné hodnoty zisku a zesilovač vstupní signál zesílí. [15][16][17]



Obrázek 3.4: Graf inverze populace tří úrovněvého energetického EDFa systému [17]

Zisk signálu vychází z hodnot populací pro jednotlivé hladiny. Přes optické zesilovací vlákno prochází dva signály, které interagují s erbiem, signál pumpy a nosný signál a směr šíření jich obou je ve směru osy vlákna. V případě tří úrovněvého energetického modelu musíme ještě vzít v úvahu kolísání intenzity signálu a pumpy. Intenzita signálu, který takto získáváme, se pak určí následovně:

$$I(z) = \frac{P(z)\Gamma}{A_{eff}} \quad (3.7)$$

Faktor překrytí mezi erbiem a polem světelného signálu je označen jako Γ a je dán jako funkce průchodu zesilovacím vláknem $P(z)$. A_{eff} je efektivní příčná oblast rozdělení iontů erbia. Tedy tento základní vztah říká, že za intenzitu elektromagnetického pole v určitém bodě zesilovacího vlákna z , bude považována průměrná hodnota, vypočítána jako množství výkonu, který je přenášený skrz erbiem dotovanou oblast vlákna. Světelný signál, jdoucí přes zesilovací vlákno, bude utlumen, nebo zesílen, po uražení určité vzdálenosti, v závislosti na absorpci, způsobenou ionty erbia v základním stavu a stimulovanou emisí, díky iontům v excitovaném stavu. [10][11][16][17]

Signál se při průchodu skrz zesilovací optické vlákno zesílí, pokud je intenzita pumpy větší, než je hraniční intenzita, pod podmínkou, že intenzita vstupního signálu, má mnohem menší hodnotu, než je jeho saturační hodnota. Tedy vstupní signál musí být slabý a výkon pumpy musí být velký a přenosová funkce pumpy musí být konstantní po celé délce zesilovacího vlákna.

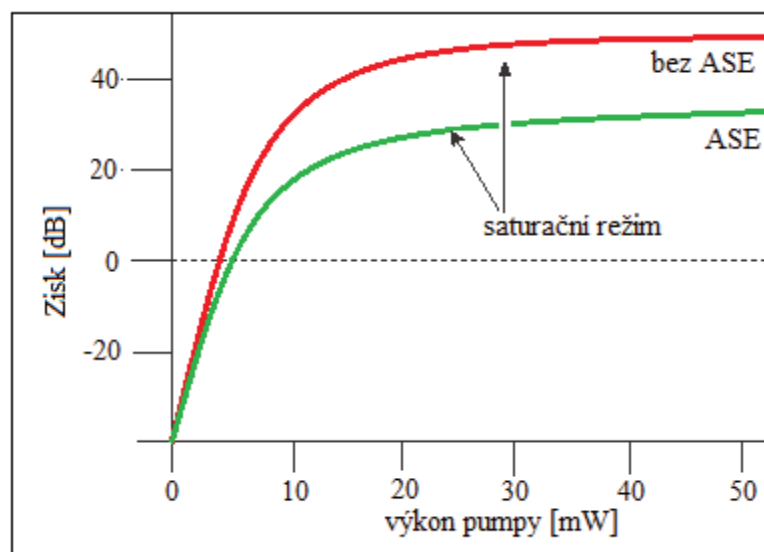
Pokud intenzita vstupního signálu dosahuje velkých hodnot, zesilovač se dostává do saturačního režimu. Růst signálu je omezen saturačním faktorem a je pak přibližně dán následující rovnicí:

$$\frac{dI_s}{dz} = I_{\text{sat}} \left(\frac{I_p^{p-1}}{I_p^p + 1} \right) \sigma_s N \quad (3.8)$$

Díky tomu lze pak dále říct, že zisk v jednotkách decibelů je při délce zesilovacího vlákna L definován následovně:

$$G = 10 \log \left(\frac{I_s(z=L)}{I_s(z=0)} \right) \quad (3.9)$$

Následující graf, zobrazuje signálový růst a saturační režim při použití Al-Ge-Si optického vlákna s příměsí erbia o délce patnáct metrů s vlnovou délkou signálu 1550nm a pumpou 980nm. Dále je do grafu také přidán vliv spontánní zesílené emise ASE, který snižuje dosažitelný zisk signálu. Vliv ASE se projevuje při hodnotě signálu v okolí 20 dB. Saturační výkon není konstantní, ale roste lineárně s výkonem pumpy, což se děje proto, že ionty sestupující z druhé hladiny, pomocí stimulované emise signálem, jsou okamžitě dostupné k absorbování pumpovacího záření a mohou se tedy hned dostat opět do excitovaného stavu. Saturační výstupní výkon je definován jako signálový výstupní výkon, při kterém je zisk redukován o hodnotu 3 dB. [16][17]

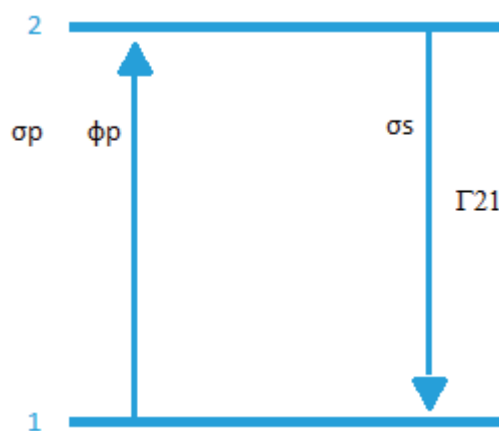


Obrázek 3.5: Saturace zisku EDFA zesilovače s ASE a bez ASE šumu[17]

3.4.3 Dvouúrovňový energetický systém EDFA

Vše probíhá tak, že do zesilovacího vlákna, které obsahuje příměsi prvků vzácných zemin, přichází vstupní signál. Vláknem je vybudeno zářením pumpy o vlnové délce 1480nm. Elektrony atomů ve vlákně jsou pak absorbováním energie pumpy excitovány do vyšší energetické hladiny. Tato hladina se jmenuje metastabilní, což je označení pro energetickou hladinu, ze které se pak elektrony dostávají přímo do základní hladiny. Na metastabilní hladině elektrony setrvávají určitý okamžik a následně, při průchodu signálového světla, které způsobuje stimul, přechází zpátky do základní hladiny. Během přechodu vyzáří svou energii, kterou získaly při excitaci, ve formě fotonu. Na základě stimulované emise pak má daný foton stejné vlastnosti jako foton stimulující.

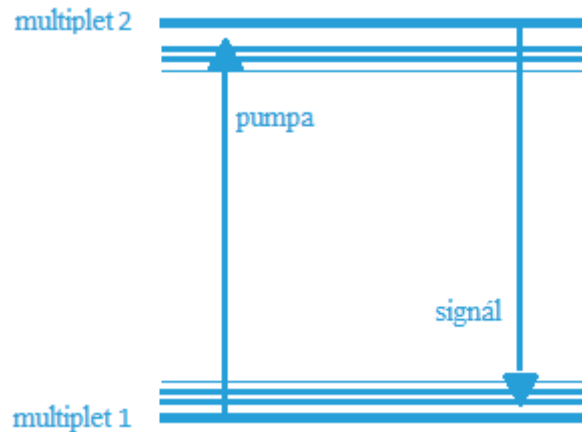
Pumpování energie na vlnové délce 1480nm představuje spolehlivé, cenově dostupné řešení a účinnost, tedy schopnost přeměnit pumpovací výkon na výsledný výkon zesíleného signálu, je vysoká. Dále pak pumpovací laser vykazuje menší útlum, ovšem ve větším rozsahu vlnových délek optického spektra. Nevýhodou je rychlejší opotřebování laseru pumpy a při takovémto pumpování se zvyšuje šum.[16][17]



Obrázek 3.6: Dvouhladinový energetický systém EDFA[11]

Množství elektronů, které se nachází na jednotlivých energetických hladinách, se označuje jako populace. N_1 představuje množství elektronů v základní hladině, N_2 představuje pak počet elektronů v metastabilní hladině. Pro zesílení je potřeba zajistit inverzi populace, tedy větší množství částic se musí nacházet v metastabilní hladině. Celková hodnota populace, je pak obdobně jako u tříúrovňového energetického modelu dána jako součet dílčích populací.

K zjednodušení energetického úrovňového systému vede fakt, že energetické hladiny, které nejsou od sebe příliš vzdálené, se slučují do multipletů. Za předpokladu, že energetické úrovně 3 a 2 jsou součástí stejného multipletu a přechod do základní hladiny 1 představuje významný přechod mezi multiplety, lze se na celý proces dívat zjednodušeně. Pokud budeme pumpovat celý systém zářením o vlnové délce 980nm, tak v druhém multipletu bude docházet k vnitřním tepelným přechodům energie. Energetická úroveň 3 bude mít tedy určitou konečnou hodnotu populace. Následně bude docházet k stimulované emisi, jejíž množství bude závislé na populacích všech úrovní, které budou v procesu zahrnuty. Pokud budeme vyzařovat signál z pumpy o vlnové délce 1480nm, 3 úroveň se bude nacházet vysoko nad spodní hladinou multipletu, její hodnota populace bude nízká, pravděpodobnost emise z této hladiny bude taky nízká. Většina populace se bude nacházet na spodní hladině multipletu a absorpční hodnota 3 hladiny bude vysoká. V takovém případě lze celý proces zjednodušit do dvouúrovňového systému.[16][17]



Obrázek 3.7: Energetické úrovně mezi dvěma multiplety [17]

Díky tomu, že zjednodušení umožňuje vypustit účast třetí energetické hladiny, celková populace je tedy dána součtem hodnot dílčích populací pro dvě hladiny, ty jsou pak definovány následovně:[17]

$$\frac{dN_2}{dt} = -\Gamma_{21}N_2 + \left(N_1\sigma_s^{(a)} - N_2\sigma_s^{(e)}\right)\phi_s - \left(N_2\sigma_p^{(e)} - N_1\sigma_p^{(a)}\right)\phi_p \quad (3.10)$$

$$\frac{dN_1}{dt} = \Gamma_{21}N_2 + \left(N_2\sigma_s^{(e)} - N_1\sigma_s^{(a)}\right)\phi_s - \left(N_1\sigma_p^{(a)} - N_2\sigma_p^{(e)}\right)\phi_p \quad (3.11)$$

$\sigma_s^{(a)}, \sigma_s^{(e)}, \sigma_p^{(a)}$ a $\sigma_p^{(e)}$ představují hodnoty absorpce a emise pro nosný signál a pumpy. Hodnota derivace podle času z populace N_1 je pak rovna záporné hodnotě derivace podle času z N_2 . Stimulovaná emise na druhé energetické hladině přispívá k růstu elektromagnetického záření, tedy k zesílení signálu, samozřejmě absorpce pak k útlumu signálu. Díky populačním a propagačním

rovnícím se pak dají popsat zesilovací vlastnosti daného dopovaného vlákna. Propagační rovnice jsou pak dány, jako funkce délky zesilovacího vlákna a vypadají následovně:[16][17]

$$\frac{dI_p(z)}{dz} = \left(N_2 \sigma_p^{(e)} - N_1 \sigma_p^{(a)} \right) I_p(z) \quad (3.12)$$

$$\frac{dI_s(z)}{dz} = \left(N_2 \sigma_s^{(e)} - N_1 \sigma_s^{(a)} \right) I_s(z) \quad (3.13)$$

I v případě dvouúrovňového energetického modelu je potřeba zajistit populační inverzi k tomu, aby byl signál zesílen, a z toho důvodu se opět stanovuje hraniční hodnota intenzity pumpy:[17]

$$I_{th} = \frac{h\nu_p}{(\sigma_p^{(a)} - \sigma_p^{(e)})\tau_2} \quad (3.14)$$

3.4.4 Šum zesílené náhodné emise ASE

Tento důležitý a nezanedbatelný jev je přítomný ve všech optických zesilovačích. Všechny excitované elektrony mohou spontánně přejít zpátky do základního stavu a vyzářit tak foton, který je nekoherentní s fotony signálu. Takto spontánně emitovaný foton může být následně zesílen díky jeho průchodu zesilovacím vláknem a tím stimuluje vznik dalších fotonů, které jsou koherentní s původním spontánním fotonem. K tomuto jevu může dojít na kterékoliv vlnové délce uvnitř fluorescenčního spektra zesilovače. Fotony, které jsou určeny pro signálové světlo, jsou pak na místo toho, využity k zesílení ASE. Následkem je snížení hodnoty maximálního zisku zesilovače. Vše je patrné na obrázku 10 (Obr. 10).

K určení hodnoty ASE šumu na výstupu zesilovače je potřeba vyčíslit výkon spontánní emise v daném bodě vlákna. Tento výkon se také někdy označuje za ekvivalent výkonu šumu. Pro jednovidová vlákna s dvěma nezávislými polarizacemi, s daným módem, při určité frekvenci, je výkon šumu při dané šířce pásma vypočítán následovně a jeho hodnota odpovídá spontánní emisi:

$$P_{ASE}^0 = 2h\nu\Delta\nu \quad (3.15)$$

Ionť erbia, excitovaný na vyšší hladinu, může přejít do základního stavu jak spontánní tak stimulovanou emisí. Podle principu kvantové mechaniky je poměr spontánní emise v daném módu stejný jako při stimulované emisi, pokud je v tomto módu přítomen pouze jeden foton a určuje se jeho výkon. Foton, jehož energie je určena jako součin Planckovy konstanty a frekvence, má rychlost c a urazí vzdálenost L v čase, který je dán jako podíl vzdálenosti a rychlosti. Šumový výkon fotonu je pak určen následovně:

$$P = \frac{h\nu c}{L} \quad (3.16)$$

Jestliže uvažíme větší množství šířících se vidů při dané šířce pásma, vidová hustota pak může být určena jako $2L\Delta\nu/c$. Pokud vezmeme v úvahu obě polarizace, vidová hustota je pak dvakrát tak větší, tedy $4L\Delta\nu/c$. Celkový výkon šumu je pak dán jako výkon šumu jednoho fotonu pro každý mód vynásobený celkovým počtem módů v dané šířce pásma.

Velikost ASE šumu není závislá přímo na parametrech přenosového jednovidového vlákna, nicméně je třeba vzít v úvahu počet vidů, které se ve vlákně šíří. Potlačení tohoto jevu spočívá například v úpravě množství dopování vlákna při jeho výrobě, či použití různých délek vlákna. Hodnota se mění závisle na směru čerpání energie. [2][11][12][25]

3.4.5 Vhodná délka zesilovacího vlákna a typy pumpování

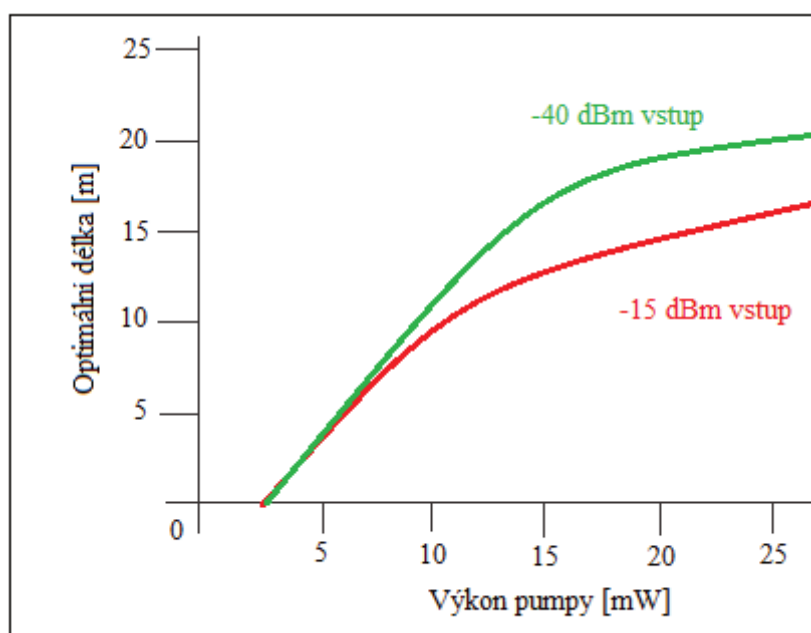
Při zapojení optického zesilovače pracujícího na principu dopování prvků vzácných zemin se využívá několika variant dodávky energie pumpou. První variantou je dodávání energie ve směru šíření signálového paprsku vláknem. Dále pak lze vlákno dopovat v opačném směru, tedy v protisměru šíření signálu. Další možností je dodávat energii v obou směrech.

Pokud se dodává energie ve směru šíření signálu, je možno dosáhnout nižších hodnot šumu, ovšem za cenu nižšího výkonu, což lze využít například v předzesilovači, který tím pak vysílá signál s co nejnižšími hodnotami šumu. Naopak v protisměru je kontrastně hodnota šumu vyšší a zároveň se pak dá dosáhnout vyššího výkonu. Pokud se pumpuje energie v obou směrech, lze použít rozdílné vlnové délky, čímž lze kombinovat chování zesilovače podle matematických aparátů tří a dvou úrovněového energetického modelu

Pumpovat lze také vzdáleně a to také v obou, či jednom směru. Vzdálené pumpování spočívá v tom, že samotná pumpa se může nacházet daleko od místa, kde dochází k zesílení signálu. Toho se využívá v situacích, kdy je komplikované umístit zdroj energie v oblastech, ve kterých je třeba signál zesílit. K dodávce energie se pak používá odlišné vlákno než signálové, nejčastěji se jedná o nízko ztrátové vlákno. Nutné je vzít v úvahu, že výkony záření, dodávané pumpou, jsou při vzdáleném pumpování vysoké, a variace všech negativních jevů mají pak větší dopad.

Způsob, jakým dodáváme energii do místa, kde dochází k zesílení signálu, je důležitý, ovšem ne méně důležitým parametrem je také vhodná délka zesilovacího vlákna. K jejímu správnému určení je třeba vědět, že je závislá na úrovni dotace vlákna prvky vzácných zemin, k čemuž se pojí také hodnota absorpce, která se uvádí samotným výrobcem vlákna. Podél osy šíření světelného signálu přes zesilovací vlákno obecně zisk narůstá, ovšem pouze do dosažení určitého bodu, od kterého dál pak nastává pokles. Vhodná délka vlákna je tedy určena bodem, kde výkon pumpy klesne na hraniční hodnotu. Tato délka je vhodná pro maximalizaci zisku signálu. Vliv ASE způsobuje snížení zisku zesilovače, tím se mění i vhodná délka zesilovacího vlákna v závislosti na maximální hodnotě zisku, kterého s danou hodnotou ASE je možné dosáhnout.

Následující obrázek zachycuje zvyšování výkonu pumpy až do saturačního bodu, za kterým zisk klesá. To je důvodem, proč se hledá optimální délka zesilovacího vlákna. Pumpování probíhá na vlnové délce 980nm za účelem zisku pro délku vln 1480nm[16][17][25]



Obrázek 3.8: Závislost výkonu EDFA na délce dopovaného vlákna[17]

3.4.6 Teplotní závislost EDFA zesilovače

Určení teplotní závislosti EDFA zesilovačů je důležité zejména pro jejich použití v optických WDM systémech. K tomuto účelu se využívá fyzikálního modelu, jehož vstupními parametry jsou energetická hustota při dané energetické úrovni, excitační koeficienty mezi nižší a vyšší energetickou hladinou a rozdělení elektronů napříč energetickými úrovněmi. Tyto parametry se ovšem v praxi velmi složitě zjišťují, a proto se musí provést určité zjednodušení, aby tento model mohl být využit pro zjištění spektra zesílení.

U WDM systému se teplotní závislost EDFA projevuje změnou tvaru a úrovně emisních a absorpčních spekter, které u starších systémů bylo možné tolerovat. Dnes se díky vývoji využívá větší množství vlnových délek, větší přenosové rychlosti a přenos na větší vzdálenost, proto je důležité, aby zesilovače pracovaly konzistentně bez ohledu na změny teploty. Prvky vzácných zemin v křemíkových materiálech jsou považovány obecně za teplotně nezávislé, poskytují zisk od 15 dB do 45 dB, který slouží ke kompenzaci parazitních jevů, které vznikají přenosem signálu skrze médium. Bylo zjištěno, že pokud dojde k jednorázové změně ziskového koeficientu EDF vlákna, vyvolané změnou teploty, bude výsledkem pokles zisku o tři desetiny decibelu u zesilovače s 30 dB ziskem. Tato změna je významná, protože k dosažení plošného zesílení, se toleruje 1 dB rozdíl zisku pro jednotlivé kanály.

Hodnota koncentrace aktivních iontů v médiu N a pravděpodobnost, že elektron bude na dané energetické hladině jsou parametry, ze kterých se vychází. Součet pravděpodobností pro všechny zúčastněné hladiny musí být roven jedné. Elektromagnetická vlna s danou frekvencí ν a intenzitou I šířící se podél osy vlákna je dána propagační rovnicí:[18][19]

$$I(z) = I_0 e^{gz} \quad (3.17)$$

Ziskový koeficient, označen jako g , je určen pomocí hodnoty populace, hodnoty emise, pravděpodobnosti výskytu elektronu a statistické hodnoty zátěže pro nižší a vyšší energetickou hladinu, které se zúčastní přechodu. Pokud jsou energetické hladiny od sebe odděleny energetickým rozdílem, který je dán součinem Planckovy konstanty a frekvence záření, lze provést součet jednotlivých ziskových koeficientů a tím určit celkový zisk. Každá energetická úroveň je složena z vibračních pod-úrovní a platí, že teplotní závislost EDF vláken je způsobena rozdílnou hodnotou pravděpodobností hustoty osídlení uvnitř každé energetické hladiny. Hodnota osídlení mezi dvěma úrovněmi je pak popsána Boltzmanovým pravidlem, pomocí teploty, udané v Kelvinových stupních a Boltzmanovy konstanty. Nejčastější forma se zapisuje jako funkce energie daná:

$$P(E) = e^{-\left(\frac{E}{kT}\right)} * f(T) \quad (3.18)$$

Teplotní funkce $f(T)$ představuje teplotní vliv, který splňuje normalizační podmínku. Díky tomu, že každá energetická úroveň má konečný rozsah, lze říci, že součet pravděpodobností osídlení všech pod-úrovní dané energetické úrovně musí být roven jedné. S využitím tohoto pravidla se určí hodnota nejnížší a nejvyšší pod-úrovně:

$$\int \rho(E)P(E)dE \quad (3.19)$$

Energetická hustota všech stavů je označována jako $\rho(E)$. Tato rovnice představuje ekvivalent pro tvrzení, že pravděpodobnost výskytu elektronu na určité hladině je pro všechny hladiny dohromady rovna jedné, ovšem už je zde zahrnut i vliv teploty. Za předpokladu existence dvou energetických úrovní, které mají energetické hustoty navzájem shodné, lze pro každou z nich stanovit patřičnou podmínku podle vztahu (3.18). Pak pomocí transformace součtu ziskových koeficientů určit jejich hodnotu pro případy, kdy je většina populace na vyšší energetické hladině a na nižší. Následně lze určit absorpční a emisní koeficienty, jejichž porovnáním lze získat následující vztah:

$$g * (v) = \alpha(v) * e^{\left(\frac{\Delta E(T) - hv}{kT}\right)} \quad (3.20)$$

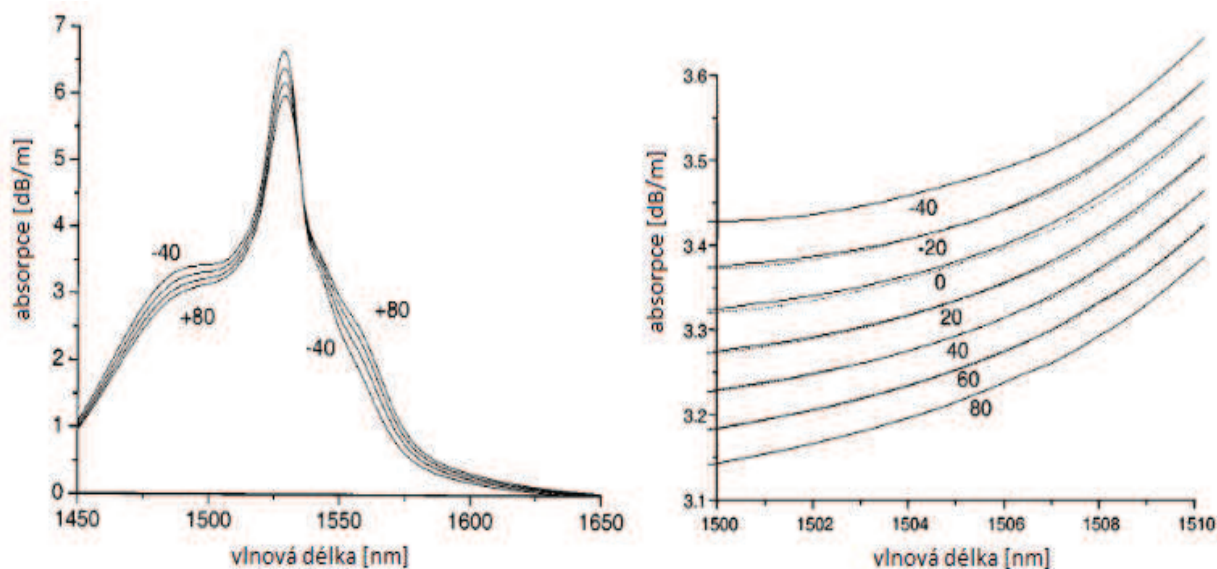
Jedná se o McCumberův vztah, kde $g^*(v)$ a $\alpha(v)$ představují absorpční a emisní koeficienty. Veškerá tato pravidla platí ovšem pouze v případě, že všechny ionty erbia jsou identické, mají stejnou energetickou hustotu $\rho(E)$ a hodnotu stimulované emise σ . V reálné situaci ovšem nelze tyto podmínky zcela zajistit, protože každý iont erbia má lehce odlišné okolí a díky tomu by měly být výsledky všech rovnic zprůměrovány. Nicméně experimentální hodnoty ukázaly, že McCumberova rovnice stále s velkou přesností reprezentuje teplotní závislost EDF.

Konkrétní výpočet by v ideálním případě probíhal tak, že se nejdříve určí absorpční a emisní koeficient pro danou teplotu s využitím vztahu (3.19). Následně se využije McCumberův vztah (3.20) a určí se zisk. Naneštěstí určení hodnot funkcí pro výpočet potřebuje vstupní hodnoty parametrů stimulované emise a energetické hustoty; tyto parametry je ovšem velmi složité změřit, či vypočítat. Z tohoto důvodu se provádí určité zjednodušení. První možností je určit teplotní funkci $f(T)$ pro nejnížší energetickou úroveň. Předpokládá se při tom, že pro použití normalizační podmínky je energetická hustota $\rho(E)$ konstantní pro energii, jejíž hodnota je vyšší než hodnota energie nejnížší sub-úrovně nejnížší energetické hladiny, neboť výpočet a jeho výsledek by neměly být závislé na velikosti energetické hladiny.[18][19][20]

$$f(T) = \frac{c}{T} \quad (3.21)$$

Další možností je upravit výpočet pro absorpční a emisní koeficienty. Poté, pokud budeme pracovat v určitém teplotním rozsahu, lze výpočet značně zjednodušit a místo teplotních funkcí získat funkce vlnové délky, které jsou v relaci s emisní hodnotou a energetickou hustotou. Následně, pokud budeme mít změřena dvě rozdílná spektra při dvou různých teplotách, lze je pak pomocí matematického aparátu využít pro vykreslení spektra dané teploty.

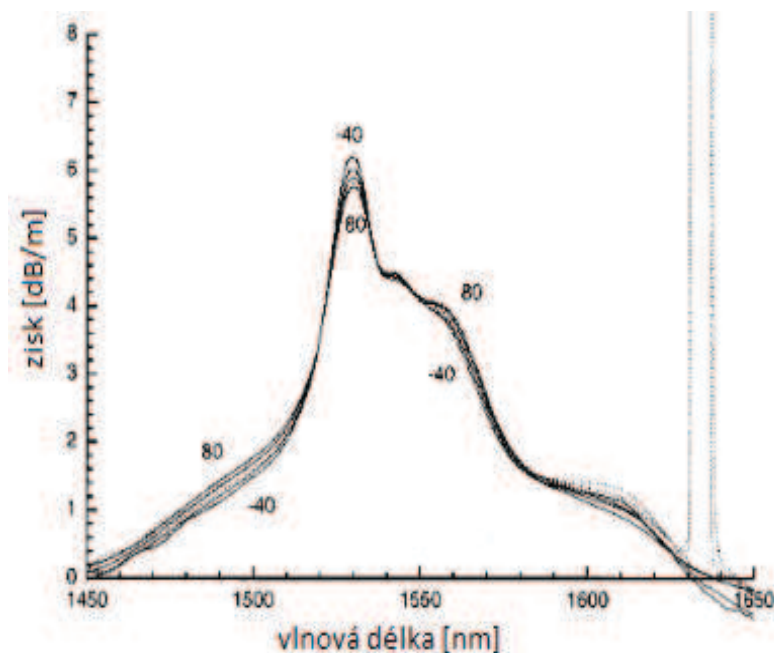
Na základě těchto matematických modelů bylo provedeno experimentální měření s použitím typických křemíkových EDF vláken pro zjištění absorpčních a emisních spekter v rozmezí teplot od 40 stupňů po nulou až po 80 stupňů nad bodem mrazu s krokem 20 stupňů Celsia. Pro výpočet byly použity spektra pro -40 a 80 stupňů Celsia. Naměřená a matematicky určená spektra byla pak porovnána.[18][20]



Obrázek 3.9: Výsledky experimentálního měření vlivu teploty na EDF vlákno[19]

Na obrázcích jsou vykresleny absorpční spektra pro jednotlivé teploty. Plnou čarou jsou zaznamenány spektra, která byla změřena a tečkovaně naopak spektra, která byla vypočítána. Jak je vidět, vypočítaná spektra se téměř překrývají se spektry naměřenými, čímž se dá říci, že matematický aparát jen s minimální odchylkou reprezentuje reálně naměřená spektra. Spektra pro -40 a 80 stupňů se shodují na sto procent a to proto, že tato spektra byla využita k matematickým výpočtům. Pro většinu vlnových délek, které se využívají pro pumpování energie do zesilovače platí, že jejich absorpce klesá s rostoucí teplotou. Vysoká teplota je tedy předpokladem k růstu šumu pro většinu EDFA zesilovačů.

Na následujícím obrázku je vidět, jaký vliv má změna teploty EDF vlákna na ziskový koeficient a tedy na výsledný zisk. Jak je patrné, lokální maximum, nicméně spektrum jako takové, se roztáhlo zejména v oblasti vlnových délek 1450 až 1550 nanometrů. Pro jednodušší interpretaci jsou v grafu zaznamenány pouze teploty -40, 0, 40 a 80 stupňů Celsia. Je zde dobře vidět existence ESA signálového pásma v okolí vlnových délek 1600 nanometrů, které se používá pro komunikaci do kosmu. Navigační systém Galileo je vybaven takovým komunikačním aparátem. [18][20]



Obrázek 3.10: Zisk naměřený během experimentálního měření[19]

Proces, který se využil pro výpočet a predikci vývoje změn teploty na parametry EDFA zesilovače lze samozřejmě využít pro modelování vlivu také pro jiné druhy optických vláknových zesilovačů s dotací prvků vzácných zemin. Může se ovšem stát, že predikované hodnoty na základě výpočtů nemusí dostatečně odpovídat skutečné hodnotě, jak je tomu v případě erbia, zejména v případě nehomogenního Neodymia.

Pro parametry, které se využívají k matematickým výpočtům se předpokládá, že z většiny jsou to právě ony, kdo určují teplotní závislost zesilovače, nutno ovšem dodat, že samotné parametry vlákna a materiálu, ze kterých je vlákno vyrobeno, také hrají svou roli.

McCumberova rovnice se využívá k výpočtu zisku z absorpčního spektra a dvou rozdílných hodnot teplot, pro které byla spektra změřena a umožní nám predikovat výkon zesilovače v závislosti na teplotě. V reálných podmínkách se nastavuje výkon pumpy podle požadovaného zisku. Pokud zesilovač tedy operuje při konstantní teplotě, lze jednoduše uzpůsobit výkon pumpy k dosažení určitého zisku.

Podobné experimentální měření a testování bylo provedeno také pro Ytterbium dopované optické zesilovače, kdy matematický aparát je zcela jiný, jednodušší, protože na sub-atomární úrovni nemají energetické mezery, jako erbium a mají také vyšší výstupní výkon s menší potřebnou délkou vlákna, k tomu potřebnou. Výsledky ukázaly, že s rostoucí teplotou klesá zisk zesilovače. Pokud roste teplota, roste také šum, což je další negativní faktor a dále pak s rostoucí délkou zesilovacího vlákna šum roste také. Hranice, kdy začíná hodnota šumu hrát roli, je v případě YDFA kolem 5 metrů.[18][19][20]

3.5 Hybridní optické zesilovače

Na počátku devadesátých let minulého století bylo v návaznosti na WDM-PON velmi široce diskutovaným tématem použití těchto sítí pro dosažení maximálního možného potenciálu využití přenosového pásma média, přes nějž prochází signál. V této době došlo k navržení DWDM systémů s

20 až 50 kanály, na konci tohoto desetiletí pak systémů s až 160 kanály. Počet kanálů a tím využitá šířka přenosového pásma dosahují pozoruhodných čísel, nicméně v optických komunikacích je degenerace signálu v průběhu přenosu způsobena různými nelineárními a jinými dominujícími jevy. Počet uživatelů, kteří mohou být v síti připojeni, se rozšiřuje zvýšením výkonu, nebo snížením ztrát. Zesílení bylo zajištěno využitím regenerátoru, komplexního prvku, který značně zpomaloval celou síť procesem demultiplexace, opto-elektro-opto převodem signálu a následně zpětné multiplexace. V síti, kde je kladen tak obrovský nárok na rychlost, je regenerátor prvkem, který je v řetězci nejpomalejší. Z tohoto důvodu se využívají zesilovače, které jsou schopny zesílit signál již ve formě světla. Naneštěstí existuje množství negativních jevů jako je SPM, XPM, saturace, čtyřvlnné směšování FWM a další. Tyto jevy představují pro optické zesilovače omezení využití v různých aplikacích. Díky tomu vzniká poptávka po optickém zesilovači, který zajišťuje lepší výkon z hlediska nelinearity, přechodových ztrát, přeslechů, zesílení a větší šířku pásma pro DWDM systémy.

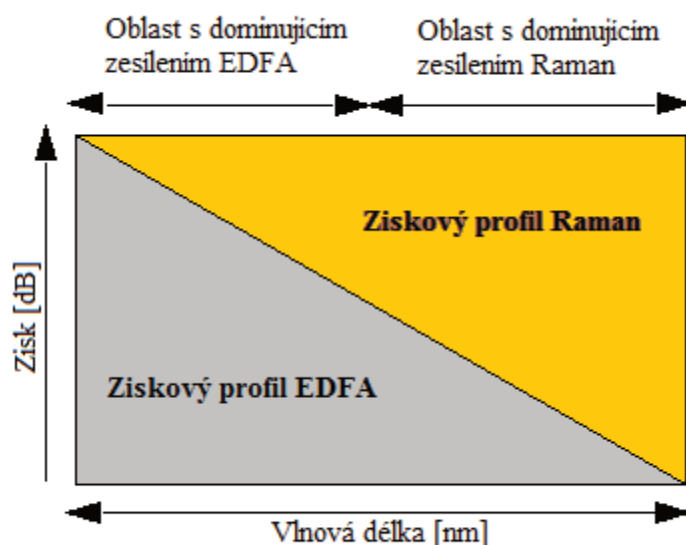
Dosud byly v této práci popsány jednotlivé druhy zesilovačů s jejich výhodami a nevýhodami. V dnešní době, jsou ale v stále větší oblasti zájmu hybridní optické zesilovače HOAs, které jsou slibnou technologií pro dnešní širokopásmové, vysokorychlostní, optické systémy. Obecně platí, že kombinace více než jednoho optického zesilovače v libovolné konfiguraci, se nazývá HOA. Cílem této technologie je zvýšit šířku pásma WDM systémů a snížit ztráty způsobené nelinearitami. Samozřejmě, tyto zesilovače také mají určitá negativa, mezi které se řadí přeslechy, různé druhy šumu, Rayleighův rozptyl a další.

Podle studie Islam celkový zisk hybridního zesilovače je dán součtem zisků všech zesilovačů tvořících daný hybridní zesilovač.

Nejvýznamnějším hybridním zesilovačem je kombinace EDFA a Ramanova zesilovače. Zisk v tomto případě bude dán následovně:

$$G_{HOA} = G_{RAMAN} + G_{EDFA} \quad (3.22)$$

Tento typ hybridního optického zesilovače je zároveň základním typem a představuje vhodnou technologii pro vysoko kapacitní DWDM systémy. Následující obrázek zachycuje ziskové profily zesilovačů, použitých v kombinaci, při pokrytí určitého spektra vlnových délek hybridním zesilovačem. Některou oblast vlnových délek zesiluje efektivně EDFA, především pásmo C a L, naopak jiná oblast, kterou už erbiový zesilovač zesílit neumí, je zesílena Ramanovým zesilovačem. Jak je vidět, každý z nich vykazuje určitou plošnost zesílení, které ovšem není dosaženo pro velké rozpětí vlnových délek. Kombinace obou zesilovačů, ať už kaskádní, či paralelní, umožňuje dosáhnout plošného zesílení pro větší spektrum vlnových délek a zároveň dosahuje i vyšší zisk.[21][22][23]



Obrázek 3.11: Obecné znázornění podílu zesílení hybridního zesilovače složeného z EDFA a Ramanova zesilovače[21]

Výběr typů zesilovačů a jejich způsob zapojení se různí podle požadavku sítě, zda potřebujeme například vysoký zisk, nebo velkou šířku pásma. Stejně, jako jednočipové přepínače, převodníky vlnové délky, nebo logická hradla, jsou polovodičové optické zesilovače SOA nejlepší alternativou pro jejich kompaktní velikost a nízkou spotřebu v porovnání s Ramanovým a EDFA. Naopak zesilovače, dopované prvky vzácných zemin, jsou vhodné pro vysoko ziskové aplikace. Ramanovy zesilovače lze nasadit pro vlnové délky, které jiné zesilovače zesilují málo, nebo vůbec. Tyto zesilovače také dokážou kompenzovat nejlépe ze všech šum, na druhou stranu spotřebují velké množství výkonu.

Čím více narůstá zatížení sítě, tím více jsou hybridní zesilovače slibnou a široce používanou technologií, pro zesílení kanálů, které leží blízko vedle sebe, s tím, že se zlepší i výkon.

Podle studie, vydané Mezinárodním institutem pro výzkum počítačových komunikací, byly naměřeny a testovány hybridní zesilovače Raman-EDFA, Raman-SOA, EDFA-SOA. Výsledky byly vyhodnoceny a porovnány. Studie se zaměřila na popis parametrů signálu měnících se v závislosti na uražené vzdálenosti signálového paprsku. Tyto parametry představují výstupní výkon, poměr chybových bytů, diagram oka a faktor kvality.

Prověřována byla vzdálenost od 90 do 240 km. Následující tabulka ukazuje dosažené vzdálenosti jednotlivých typů hybridních zesilovačů s danými hodnotami faktorů kvality a bitovému poměru chyb.[21][22]

Tabulka 1.3: Srovnání základních typů HOA[21]

Typ HOA	Raman-EDFA	Raman-SOA	EDFA-SOA
Vzdálenost [km]	224	218	211
BER	$1.96 \cdot 10^{-10}$	$1.01 \cdot 10^{-9}$	$4.16 \cdot 10^{-11}$
Q faktor [dB]	15.05	15.4	16.41

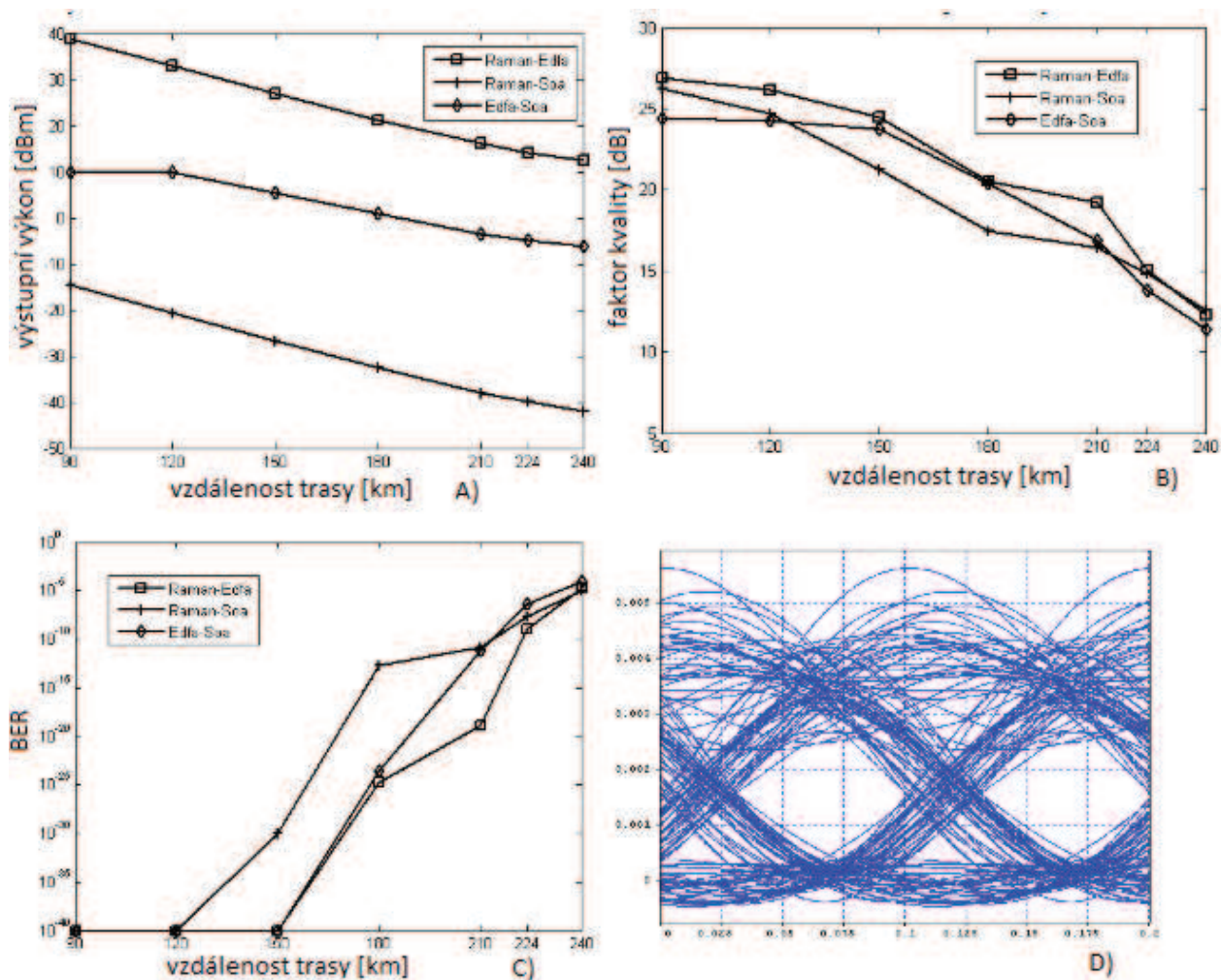
Signál by jistě dokázal dosáhnout větší vzdálenosti, ovšem za touto hranicí by se stal už na tolik slabým, že by jeho limity, co se kvality a chybovosti týče, byly překročeny.

Na následujícím obrázku graf A, je znázorněna část optického spektra výstupního výkonu měnicího se vzdáleností od 90 do 240km. Nejlépe na tom je Raman-EDFA zesilovač, jehož výstupní výkon se pohybuje v rozmezí od 40 do 12,5dB, EDFA-SOA od 9,7 do -6,2dB a Raman-SOA od -14,6 do -41,8.

Obrázek B ukazuje stejnou vzdálenost, ovšem z pohledu faktoru kvality. Jak je patrné i z grafu, s rostoucí vzdáleností hodnota faktoru klesá. Maximální hodnoty opět dosahuje Raman-EDFA, v konečném důsledku má pak nejnižší hodnotu EDFA-SOA.

Další graf C, pak znázorňuje posouzení z pohledu BER parametru. Zde je vidět, že s rostoucí vzdáleností poměr roste, což je nežádoucím faktorem. V tomto grafu je vidět, že nejlépe na tom je opět Raman-EDFA.

Nejlepším zachyceným diagramem oka je obrázek D. Raman-EDFA zesilovač opět dokazuje svou kvalitu. Tento diagram byl zachycen při vzdálenosti 240km. V průběhu trasy byly opět porovnány jednotlivé diagramy oka. Čím více je oko rozevřené, tím menší je hodnota BER, což znamená dobré komunikační podmínky. Diagram oka Raman-EDFA zesilovače při vzdálenosti 240 km odpovídá diagramu oka EDFA-SOA zesilovače při vzdálenosti 90km. To je obrovský rozdíl. Raman-SOA zesilovač je pak nejhorším. Jeho diagramy oka jsou horší než EDFA-SOA zesilovače při 240 km.[21][22][23][24]



Obrázek 3.12: Porovnání HOAs v závislosti na výkonu BER, faktoru kvality a diagramu oka[21]

Jak je patrné z grafů na obrázku, nejlepších výsledků bylo dosaženo s hybridním zesilovačem tvořeným EDFA a Ramanovým zesilovačem. Erbiem dopovaný zesilovač se postará o vysoký výstupní výkon a Ramanův zesilovač zase o potlačení nepříznivých vlivů a pokryje oblast vlnových délek, kde se už EDFA nedostane. Nejhorším zesilovačem pak byl Raman v kombinaci se SOA a to ve všech typech testování.[23][24]

4 Návrh a příprava měřicího pracoviště

Předěšlé kapitoly se detailně věnovaly popisu optických komunikací, které jsou dnes nejvyužívanější a nejvýkonnější v oblasti páteřních a přístupových sítí, a dále se zabývaly principem a účelem optických zesilovačů, jejich základními technickými vlastnostmi, které je nutno znát pro následné nasazení a použití.

Po tomto základním technickém přehledu následoval hlubší popis práce optických vláknových zesilovačů, které využívají prvků vzácných zemin. Byly vysvětleny a popsány matematické modely, týkající se především výměny energie v kvantových energetických úrovních při činnosti těchto zesilovačů. Dále byl pak osvětlen vliv teploty, se kterou vláknové zesilovače pracují na jejich technické parametry.

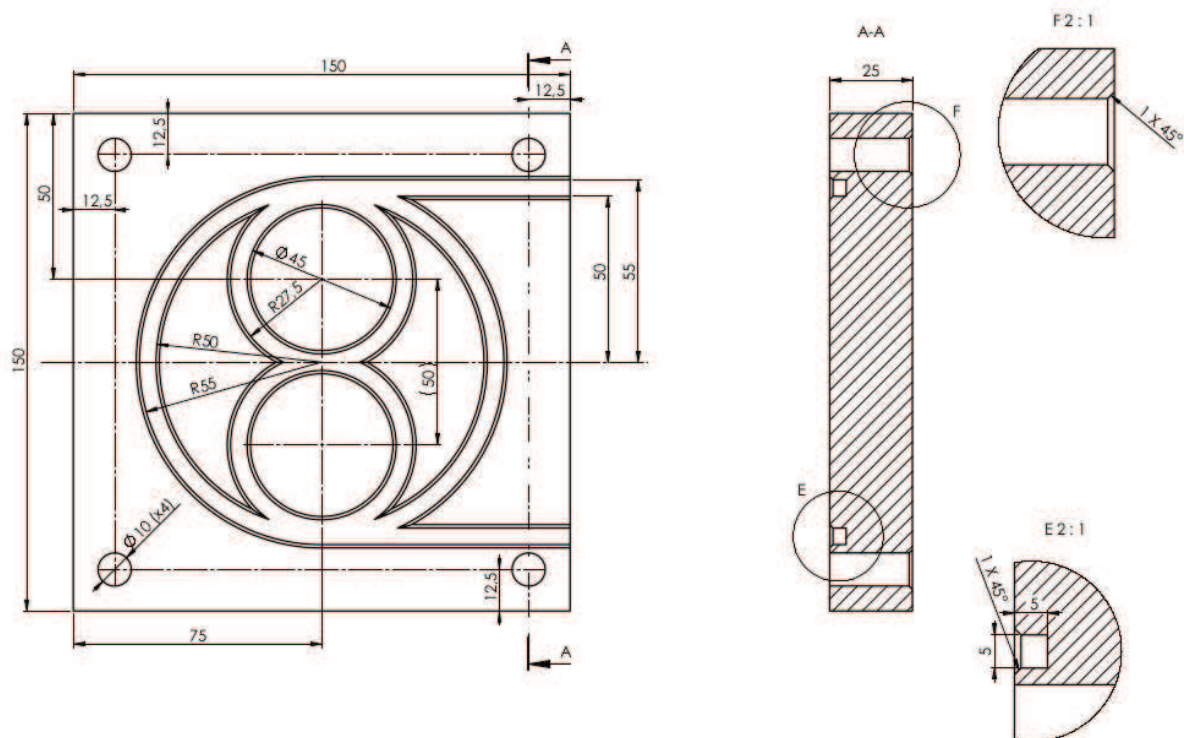
Nadcházející kapitoly jsou souhrnem výsledků praktických měření, ve kterých se teplotní vliv popisuje v reálných podmínkách při variaci teplotních změn, zejména pod bodem mrazu. Měření je provedeno v souladu s body zadání. Tím, že tato práce navazuje a rozšiřuje studii, která byla sepsána dříve v rozmezí kladných teplot, bylo využito již sestaveného měřicího pracoviště k účelům měření. Samotné pracoviště bylo modifikováno a přizpůsobeno k měření s teplotami pod nulovou hranicí.

Následně je v práci zpracována simulační část měření EDFA zesilovače pomocí Optiwave Optisystem. Měření a simulace zesilovače jsou provedeny v nasazení v WDM-PON síti. Výsledky jsou porovnány za účelem dosažení výstupu a určení, jak se daná zesilovací vlákna chovají při teplotním zatížení pod nulovou hranicí.

4.1 Měřicí pracoviště

K tomu, aby bylo možné optická, erbiem dopovaná zesilovací vlákna teplotně zatížit, bylo nutné vytvořit určité médium, ve kterém se budou ona vlákna nacházet a které bude dostatečně schopné teploty přenášet rovnoměrně po celé své ploše. K tomu nám posloužila speciálně navržená měděná kostka. Měď je prvek, který je výborný tepelný vodič s vodivostí 393 W/mK. Obrázek za textem představuje technický náčrt kostky, uvnitř které byla namotána všechna měřená vlákna v kruzích, přičemž začátky a konce vláken jsou pak vyvedeny z kostky ven. Kromě měřených vláken se v kostce nachází ještě jedno další, které není dopováno a představuje běžné optické vlákno. Slouží k monitorování teploty uvnitř kostky pomocí přístroje, který pracuje na principu zpětného světelného odrazu OTDR.

Měděná kostka je vskutku dobrým vodičem, nicméně otázkou stále zůstává, jak zajistit přenos tepla mezi kostkou samotnou a vlákny v ní namotanými. Přenos tepla mezi mědí a skelnými vlákny samozřejmě probíhá, ovšem ne na takové úrovni, jakou potřebujeme k samotnému měření. K tomuto účelu jsme využili teplo vodivé pasty, která vyplňuje spáry v kostce a prostor mezi vlákny. Výrobce této pasty je firma Termopasty sídlící v Polsku. Teplotní vodivost pasty je podle výrobce 2,8 W/mK. Pasta je šedé barvy a je učená pro práci s teplotami v rozmezí od -30 až 300 stupni Celsia. Kompletní specifikace pasty jsou pak dále uvedeny v příloze.



Obrázek 4.1: *Technický výkres měděné kostky sloužící jako médium pro měřená vlákna*

Modifikace celého měřicího pracoviště k dosažení požadovaných hodnot bylo dosaženo testováním a vyřešením několika technických překážek.

První možností bylo použít původně sestavené pracoviště pro měření kladných teplot a tím využít podchlazení vycházející ze čtyř Peltierových článků. Funkčnost je založena na principu Peltierova jevu, tedy pokud prochází elektrický proud obvodem, který má dva rozdílné vodiče, zapojené do série, jedna ze styčných ploch vodičů se bude ohřívat a druhá ochlazovat. Články se pro běžné použití vyrábí s různými velikostmi a různými parametry, přičemž základ tvoří dvě keramické destičky, mezi kterými se nachází polovodičové můstky, na kterých vzniká termoelektrické napětí. Při měření zatížení vláken v kladných teplotách byly články ideální, nicméně při ochlazování je tomu jinak. Důvodem je nízká účinnost článku samotného. Na straně, která se ohřívá, je energie ve formě tepla podstatně více, než je tomu na straně, která se ochlazuje a to z toho důvodu, že na teplé straně se k odebíranému teplu přidává také elektrický příkon. Naopak výhodou Peltierova článku je schopnost snadné regulace teploty pomocí řízení proudu a napětí, kterým jej zásobujeme. Dalším kladem je i možnost změny teplé a studené strany polaritou připojeného napětí. Lze tedy takto velmi snadno stranu, která ohřívá kostku, zaměnit za stranu, která jí naopak bude ochlazovat. V rámci našeho experimentálního měření, jsme se v souvislosti s Peltierovými články, museli vypořádat především s dvěma nejdůležitějšími technickými problémy. Prvním z nich je odvod přebytečného tepla, aby nedošlo k tepelnému poškození a pak s vlhkostí, která vniká kondenzací vzduchu vlivem tepla.

K testování podchlazení jsme využili dva typy článků, jejichž parametry jsou sepsány v následující tabulce. Prvním typem jsou původní články od výrobce Stonecooled, využívané pro měření kladných teplot. Články od výrobce Vigan byly dokoupeny z důvodu toho, že jsou jednak výkonnější, dále pak maximální teplotní rozdíl, tedy rozdíl teplot obou plošek je stanoven na dvě sta stupňů a s uvážením příkonu a požadovaných teplot pod nulou, je tento rozdíl oproti prvnímu typu dostačující.

Je zde i další významný rozdíl, kterým se články od firmy Vigan odlišují od druhé sady Stonecoled. Jedná se o silikonovou izolaci celého článku, zejména v oblasti mezi keramickými destičkami, kde se nachází polovodičové můstky.

Tabulka 1.4: *Typy Peltierových článků využitých k měření*

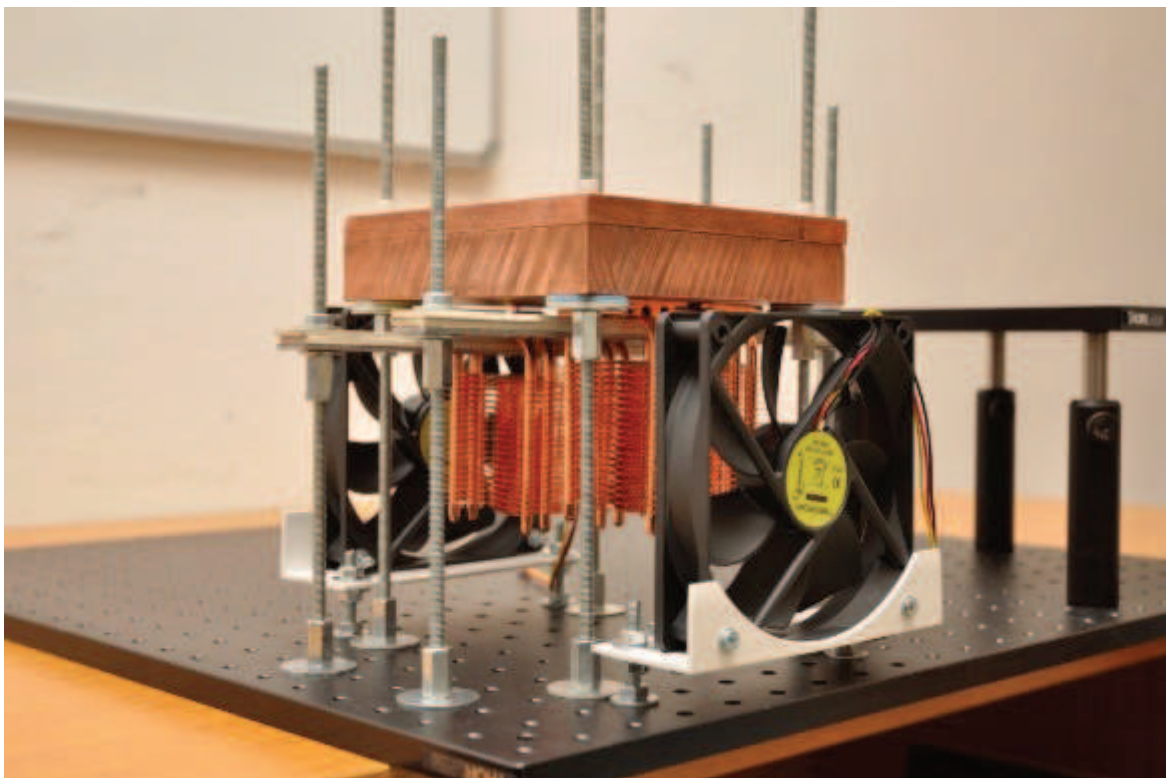
Výrobce	Stonecoled	Vigan
Vnější rozměry [mm]	40x40x3.8	40x40x3.3
Maximální pracovní napětí [V]	19.4	15.8
Maximální pracovní proud [A]	6.4	10
Pracovní teplota [$^{\circ}\text{C}$]	138	250
Maximální teplotní rozdíl [$^{\circ}\text{C}$]	68	200

Peltierovy články jsou dohromady čtyři, přičemž vždy byly nasazeny články stejného typu, aby nedocházelo k výkonnostním rozdílům. Pokud vezmeme v úvahu, že měděná kostka má spodní čtvercovou podstavu o rozměru patnácti centimetrů, tak Peltierovy články z této plochy zabraly přibližně osm centimetrů čtverečných. Aby ovšem nedošlo k poškození článku samotných a aby na ně mohly být správně uchyceny pasivní chladiče, bylo nutné mezi Peltierovými články nechat určitou dilatační mezeru o velikosti asi dvou centimetrů.

Z teplotních důvodů musel být vyřešen i způsob uchycení samotné měděné kostky. Aby nedocházelo k tepelným výměnám mezi konstrukcí, která bude sloužit k uchycení kostky, bylo využito hrazdy, která posloužila jako opěrný bod jak pro kostku tak i pro pasivní chladiče. Ty byly v kontaktu se spodní ploškou Peltierových článků, které se nacházely pod uchycenou kostkou. K zamezení přenosu tepla mezi hrazdou a kostkou se použila silikonová bužírka s vnitřním opletem ze skelného vlákna, jejíž teplotní rozsah je od mínus šedesáti, až do dvou set stupňů Celsia. Dalším teplotně izolačním prvkem byl topenářský bez azbestový materiál Klingerit s teplotní odolností přes tři sta stupňů Celsia.

Pasivní chladiče tedy v tomto stavu dokázaly odebírat přebytečné teplo a vygenerovat jej na větší ploše, čímž byl vytvořen základní chladicí systém. Nicméně teplo, vyzářené z Peltierových článků bylo stále natolik velké, že samotné pasivní chladiče by jej svým výkonem nedokázaly uchladiť. Z toho důvodu byly k zařízení dodatečně namontované počítačové ventilátory, které plnily roli aktivních chladičů a proudem vzduchu, který vířily, měly odvádět teplo z pasivních chladičů mimo kostku. Aktivní chladiče navíc plnily ještě jednu další úlohu: odvod vlhkosti, která vznikala z důvodu velkých teplotních rozdílů v tak malém prostoru.

Následující obrázek zachycuje měřicí pracoviště ve fázi výstavby v době, kdy bylo využito k měření s kladnými teplotami. Je vidět měděná kostka, ve které byla namotána měřená vlákna a vlákno pro měření teploty. Kostka je držena hrazdou. Spodní část kostky obsahuje Peltierovy články, pod kterými se nachází pasivní chladiče a po stranách uchycené ventilátory. Mezi kostkou a články a mezi články a pasivními chladiči je nanášena vrstva teplovodivé pasty, aby ztráty vlivem teplotního přenosu byly minimalizovány.



Obrázek 4.2: *Měřicí pracoviště*

Takto sestavené pracoviště bylo proměřováno pod zatížením v oblasti kladných teplot. Aby byly provedeny náměry, které odpovídají požadavkům zadání, bylo provedeno testování, z cílem určit, jak takto sestavené pracoviště dokáže naopak kostku podchladit.

To se provedlo pouze jednoduchým přehozením polarity Peltierových článků od firmy Stonecooled a jejich následným vybuzením připojením k laboratorním zdrojům. Každým článkem protékal konstantní proud čtyři ampéry, přičemž nejnižší teplota, které jsme dosáhli, činila přibližně 14 stupňů Celsia. V rámci testování by bylo následně možné zkusit články zatížit větším proudem v blízkosti maximálního dovoleného proudu, podle referenčních hodnot. Nicméně, již v tomto bodě bylo naprosto jasné, že takto podchladit kostku, pod bod mrazu, bude velmi náročné. Navíc bylo nutno vzít v úvahu i další omezení jako vlhkost a také to, že množství tepla, které se z článků uvolnilo, stále ohřívalo okolní prostředí, které zpětně oteplovalo samotnou kostku.

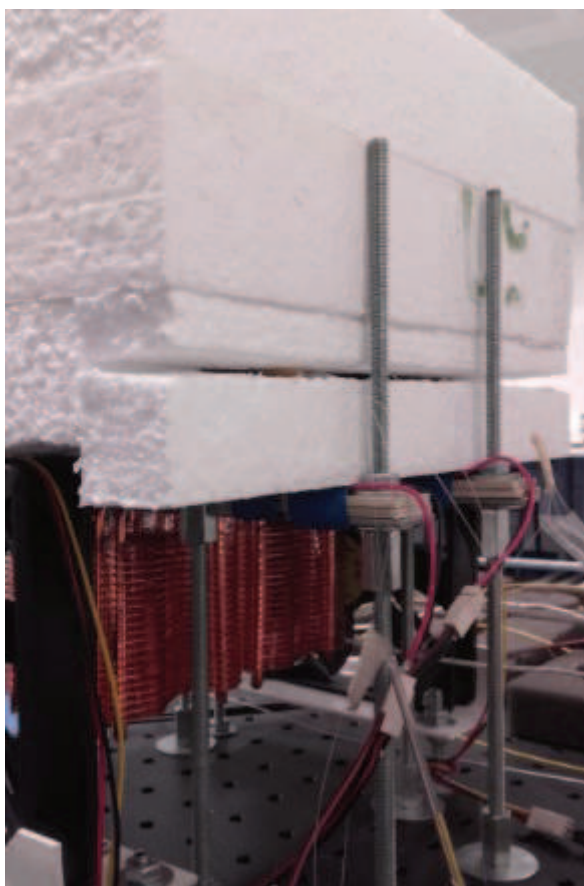
Bylo tedy nezbytné vymyslet opatření, s jejichž pomocí bychom předešli kondenzaci vodní páry, či eliminovali její dopad na elektronické zařízení, nacházející se v bezprostřední blízkosti kostky. A stále se nabízela otázka, jak izolovat samotnou kostku od okolního prostředí.

Jako řešení se v tomto případě jevilo využití běžného polystyrenu, který je využíván ve stavebnictví pro jeho snadné opracování, jednoduchou manipulaci s ním, zdravotní nezávadnost a dostatečné izolační vlastnosti. Další variantou mohla být například skelná vata, či plastické izolační materiály, termoplasty. Ty ale nevyhovovaly z finančních důvodů a také proto, že manipulace probíhala v uzavřeném prostoru, kde by mohlo dojít k podráždění pokožky, nebo jiné zdravotní komplikaci. Přesto jsme podle rozměrů měděné kostky a hrazdy, ke které byla kostka uchycena, připravili polystyrenové tvárnice s šířkou tří a pět centimetrů. Jednotlivé opracované části polystyrenu

jsme k sobě přilepili běžným polystyrenovým lepidlem, určeným pro práci s teplotami od -30 až do 150 stupňů Celsia.

Polystyren tady posloužil k redukování vlivu okolní pokojové teploty na kostku. Pak bylo potřeba se vypořádat s vlhkostí, způsobenou kondenzací okolního vzduchu. První možností byla naprostá izolace kostky a svrchní keramické plošky Peltierových článků od oblasti, kde probíhal přenos tepla na pasivní chladiče. K tomuto účelu bychom potřebovali izolační materiály, které jsou velmi přizpůsobivé svými rozměry a současně vysoce odolné teplotnímu zatížení. Takovéto řešení se opět jevilo jako finančně nákladné. Problém jsme vyřešili nasazením druhého typu Peltierových článků od firmy Vigan. Ty, jak již bylo zmíněno, mají prostor mezi keramickými destičkami vyplněn silikonem a tím se kondenzovaná voda stává neškodnou. Před jejich nasazením, bylo v rámci testování provedeno měření s původními články od firmy Stonecold. Pomocí polystyrenové izolace se podařilo kostku podchladit na dva stupně celsia.

Následující obrázek zachycuje měděnou kostku s uvnitř namotanými vlákny. Jsou zde dobře vidět i pasivní chladiče, k nimž jsou z bočních stran přidány chladiče aktivní. Celá kostka je skrytá pod polystyrenovou čepicí, která tím představuje izolační rozhraní mezi okolním prostředím a kostkou. Spodní strana kostky polystyrenem izolována nebyla z důvodu omezeného přístupu.



Obrázek 4.3: Měřící pracoviště s polystyrenovou izolací

Poté následovalo testování s nasazením nových Peltierových článků. Ukázalo se, že ač jsou tyto články výkonné a svými vlastnostmi dostačující k podchlazení kostky, vyrábí enormní množství tepla, které se pomocí pasivních a aktivních chladičů nedokáže eliminovat. Kostku jsme napájecím

proudem o velikosti čtyři ampéry podchladili na 14 stupňů Celsia, avšak při dalším zvyšování proudu, byla cirkulací teplého vzduchu zespod, opět ohřívána a tepelný výkon tak při tomto proudu převyšil chladicí výkon článků. Dostali jsme se tak do kontraproduktivního stavu.

Po opětovném zvážení a posouzení dalších možností vznikly dvě další varianty. První z nich bylo využít drahých izolačních materiálů pro izolování spodní části kostky a tím zajištění oddělení teplé a studené strany článků. Tato varianta se však jevila z části jako riskantní. Chladiče již při čtyřech ampérech nebyly schopné uchladit enormní množství tepla. Při šesti ampérech se dostáváme do stavu, kdy je vzduch, cirkulující za pomoci ventilátorů, obdobou fěnu. S větším proudem, například devět ampér, by už tak neefektivní chlazení, bylo ještě více nedostačující. Úvahou jsme dospěli k otázce, jakým způsobem by izolační materiály, s tak malou tloušťkou, dokázaly bezpečně teplotně oddělit kostku od okolního prostředí.

Další možností, bylo nasadit výkonnější chlazení článků. Nasazením výkonnějších ventilátorů, či vytvořením určitého směru proudění vzduchu, který by se nasával z jedné strany a z druhé strany by vyfukoval ven, se mohlo chlazení zefektivnit a vylepšit. Avšak ani s tak výkonnými Peltierovými články by pravděpodobně toto vylepšení nevedlo ke kýženému cíli. A tak přišla na řadu další technická varianta – vyměnit vzduchové chladicí médium za vodní.

4.1.1 **Vodní chlazení Peltierových článků**

S rostoucím výkonem Peltierových článků je nutno počítat s vyšším množstvím parazitního tepla, které je potřeba odvést. Díky tomu se stává vzduchové chlazení neefektivní, hlučné a je potřeba jej nahradit za jinou alternativu s vyšším výkonem.

Vodní chlazení představuje v porovnání se vzduchovým komplexnější a dražší metodu, ale je účinnější a výkonnější. Důvodem je především vyšší tepelná vodivost. Zatímco vzduch má hodnotu 0.0262 W/mK, voda má tepelnou vodivost mnohonásobně vyšší, a to 0.6062 W/mK. Dalším faktem je to, že voda má proti vzduchu daleko větší tepelnou kapacitu, tedy je schopna pohltit větší množství tepelné energie, než vzduch. Z hlediska principu činnosti pracuje vodní chlazení obdobně jako vzduchové. Konstrukce využívá nejčastěji dvou druhů kovů. Těmi jsou měď, která má vyšší tepelnou vodivost, ale je těžší a dražší. Proto se u některých levnějších variant používá hliník.

Chladicí médiem v případě vodního chlazení je samozřejmě voda. Ta proudí v neustálém vodním okruhu, během kterého se ohřívá a následně ochlazuje. Avšak i v případě nasazení vodního chlazení, není možné se vzduchovému ochlazování úplně vyhnout. Teplá voda cirkuluje do radiátoru, na kterém jsou nasazeny opět ventilátory a ochlazují teplou vodu.

4.1.1.1 **Prvky vodního chlazení**

Základním prvkem vodního chlazení je vodní blok. Tento prvek musí být ideálně z mědi a slouží jako rozhraní mezi ochlazovanou částí, v našem případě Peltierovými články a chladičem. Tato součástka obsahuje vstupní a výstupní místo pro přívod a odvod vody. Jelikož Peltierovy články jsou svými rozměry určené především pro chlazení počítačových procesorů a bloky vodního chlazení také, dostáváme se do ideální situace, kdy jsme schopni použít univerzální velikosti chladicích bloků, v jejichž nitru pak proudí chladicí médium. U chlazení vzduchem není nutno řešit, jak bude ohřátý vzduch opět zchlazen, aby se dal znovu použít. V případě vodního chlazení to však neplatí. Za tímto účelem lze použít radiátor.

Radiátor je prvek vodního chlazení, přes který cirkuluje teplá voda z vodních bloků. Tato část řetězce představuje bod, ve kterém se voda zchladí tím, že předá své teplo radiátoru, který pomocí kanálků a lamel rozprostře tok vody po celém svém obsahu. Existuje druhý způsob jak teplou vodu opět ochladit a to pomocí expanzní nádoby, ve které bude umístěno větší množství vody. V praxi se dají oba způsoby kombinovat a docílit tak ještě výkonnějšího ochlazení teplé vody. Na radiátorech jsou pak nasazeny ventilátory, které opět pomocí vzduchu odvádějí přebytečné teplo.

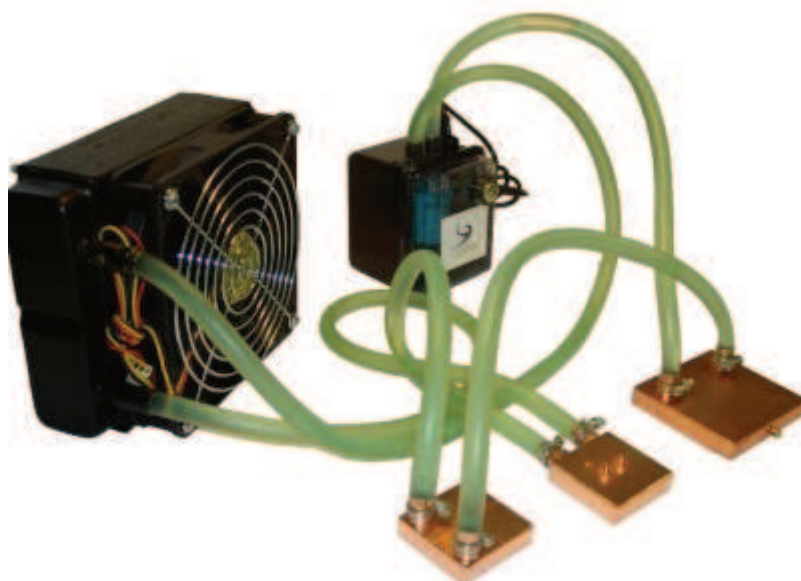
Dalším krokem je nutnost přimět vodu cirkulovat pomocí čerpadla. Čím výkonnější čerpadlo, tím větší průtok vody a lepší chlazení. Při experimentálním měření bylo třeba nasadit čerpadlo s výkonem alespoň 1200 litrů za hodinu. Výtlak by měl být alespoň dva a půl metru.

Neméně důležitým prvkem jsou hadice, které poslouží k propojení jednotlivých prvků a vytvoří vodní okruh. Z hlediska kvality se na hadicích rozhodně nesmí šetřit. Jsou stěžejním prvkem celého chlazení. K hadicím se pojí dále fitinky a svěrky, kterými propojíme hadice s vodními prvky.

Poslední částí je chladicí kapalina. Voda, proudící v takovýchto chladičích, musí být technicky očištěna od organických látek, které časem způsobují vznik vodního kamene a ten snižuje životnost chlazení. Chladicí kapalina obsahuje všechny potřebné látky k tomu, aby dodala vodě kýžené vlastnosti k cirkulaci ve vodních blocích.

Jednotlivé Peltierovy články by se daly propojit s chladicím systémem dvěma způsoby. Prvním je paralelní spojení. Toto zapojení umožňuje chladit každý článek separátně, na druhou stranu klade velké nároky na samotné čerpadlo a navíc je potřeba uzpůsobit expanzní nádobu pro několik paralelních vstupů a výstupů k chladicím blokům. Druhou variantou je spojit chladicí bloky do série, z hlediska konstrukce je to varianta jednodušší. Avšak teplá voda, proudící z prvního chladicího bloku, poteče do dalšího, až poté, co projde všemi chladicími místy prvního bloku. A to znamená, že Peltierovy články budou ochlazovány nerovnoměrně.

Následující obrázek představuje standardní zapojení vodního chlazení. Z obrázku je patrné, že jednotlivé chladicí bloky jsou zapojeny do série, přesně tak, jak by tomu bylo v našem případě. Expanzní nádoba je součástí čerpadla a radiátor je osazen ventilátorem.



Obrázek 4.4: *Příklad vodního chlazení*

Velkou nevýhodou vodního chlazení je jeho pořizovací cena. V našem případě, vzhledem k chladicímu výkonu, který je potřeba vyvinout, se pořizovací cena pohybuje v rozmezí desítek tisíc korun. Z tohoto důvodu jsme tento princip chlazení nezrealizovali. Do budoucna by mohlo být zajímavé opatřit si takové chlazení a testovat jej s Peltierovými články. Dosáhli bychom tak stavu, kdy by experimentální měřicí pracoviště bylo univerzální pro testování teploty. V případě ohřevu by se jednoduše otočila polarita napájení Peltierových článků a vodní bloky, by místo tepla, odváděly chlad. Ohromnou výhodou je ovšem to, že voda je schopná odvést přebytečné teplo z místa, kde je produkováno tepelnými články a tuto vodu posléze ochladit daleko od místa, kde probíhá podchlazování kostky s vlákny.

Když není možné, abychom podchladili kostku dostatečně s nasazením Peltierových článků a pasivních chladičů, je nutné vyzkoušet další možnosti. Jedna z cest, jak uspět, spočívala v tom, že jako chladicí médium se použije suchý led, či kapalný dusík. Všechny tyto látky jsou schopny dát velmi nízkou teplotu, nicméně není možné ji jakýmkoliv způsobem regulovat. Aby bylo možné posoudit chování vláken při nízkých teplotách, je nutné podchlazovat vlákna postupně a sledovat, jak se vyvíjí jejich chování v závislosti na teplotě.

4.1.2 Modifikovaný mrazicí přístroj

Po zvážení všech možností, se celá kostka sejmula z hrazdové konstrukce a umístila se do upraveného mrazicího přístroje, který má po svých stranách vyvrtány dva otvory. Jeden otvor slouží pro přivedení vstupního optického signálu a druhý pro výstup signálu z optických zesilovacích vláken. Za účelem dostatečného podchlazení byl vyměněn kompresor, elektrické rozvody, zabudován termostat k monitorování teploty uvnitř přístroje a teplotní čidlo NTC 10 K ve vodotěsném pouzdře pro přesnější snímání teploty. Mrazicí přístroj je vybaven LED displejem s LED relé statusem.

Termostat se obsluhuje pomocí tří ovladačů, s nimiž se nastavuje zvýšení, či snížení požadované teploty, popřípadě se třetím ovládacím tlačítkem SET nastavená teplota potvrdí. Při delším stisknutí tohoto tlačítka je možné nastavit dalších šest parametrů s označením P1 až P6:

- P0 – Volba, zda relé bude spínat při nižší, či vyšší teplotě oproti nastavené. Tato funkce určuje, zda chceme, aby se chladicí obvod sepnul v momentě, kdy teplota uvnitř mrazicího přístroje bude vyšší, než požadovaná teplota, či zda má naopak sepnout bude-li teplota nižší.
- P1 – Hystereze -představuje povolenou hranici, o kterou se teplota uvnitř přístroje liší od teploty požadované. Hraniční hodnotu lze nastavit v rozpětí od 0,1 až po 15 stupňů Celsia.
- P2 - Horní limit termostatu - maximální hodnota, na kterou můžeme nastavit termostat, výchozí nastavenou hodnotou je 110 stupňů Celsia.
- P3 - Dolní limit termostatu - minimální hodnota, na kterou můžeme nastavit termostat, výchozí nastavenou hodnotou je 50 stupňů Celsia.
- P4 - Tento parametr představuje offset, to je rozpětí teplot, ve kterém se můžeme pohybovat v rámci nastavené teploty. Primárním požadavkem je, aby po nastavení určité teploty, tato teplota byla termostatem stále udržována, nikoliv měněna v určitém rozpětí. Výchozí hodnota je stanovena na nula stupňů Celsia.

- P5 - Opoždění startu termostatu - tato funkce pro naše měření nemá žádný význam, nicméně rozpětí hodnot, pro které lze nastavit tento parametr, činí od 0 do 10 minut. Standardní hodnota je 0 minut. Požadujeme, aby termostat sepnul okamžitě.
- P6 - Upozornění na vysokou teplotu - tato funkce umožňuje zařízení, chránit se proti přehřátí, či poškození. Normálně je tato funkce vypnutá, nicméně hraniční hodnoty, které lze nastavit, jsou zároveň maximálními a minimálními hodnotami, které lze pro termostat nastavit obecně, tedy 0 až 110 stupňů Celsia.

Termostat je schopen si pamatovat veškerá nastavení i po jeho odpojení od dodávky elektrické energie. Následující tabulka obsahuje souhrnné parametry, pro námi využitý mrazicí přístroj.

Tabulka 1.5: *Parametry mrazicího přístroje*

Parametr	Rozsah
<i>Teplotní rozsah měření</i>	-50 až 110 °C
<i>Přesnost měření teploty</i>	0.1 °C
<i>Hystereze</i>	0.1 až 15 °C
<i>Obnovovací frekvence</i>	0.5 s ⁻¹
<i>Výstupní spínané napětí</i>	250 VAC
<i>Maximální proud</i>	10,00 AM

Následující obrázek zachycuje pohled na mrazicí přístroj zvenčí. K vidění je displej s panelem, pomocí kterého se nastavují požadované parametry. Další obrázek pak pohled na měděnou kostku, umístěnou v útroběch mrazicího přístroje, ležící na kovovém roštu. Vidět jsou i vyvrtané díry s umístěnou silikonovou ucpávkou, která vyplňuje prostor mezi stěnou mrazicího přístroje a mezi vstupujícími a vystupujícími vlákny. Obrázek nabízí i pohled na výparník, který vyzařuje chlad. V pozadí pak lze spatřit teplotní čidla, visící ze stropní stěny. Ty jsou určeny pro snímání teploty uvnitř mrazicího přístroje.



Obrázek 4.5: *Mrazicí přístroj s nastavovacím a monitorovacím rozhraním na stropní stěně*



Obrázek 4.6: *Útroby mrazicího přístroje*

4.1.3 Měření teploty uvnitř měděné kostky

Stěžejním bodem celé práce je schopnost ohodnotit chování vláken v závislosti na teplotě. Proto je velmi zásadní to, aby bylo možné tuto teplotu dobře měřit. Kontrolní teplotní čidla, která se nachází uvnitř kostky, měří pouze teplotu ovzduší uvnitř mrazáku. I přes to, že měď je dobrý teplotní vodič, vzduch ne a výměna tepelné energie mezi výparníkem a vzduchem a následně mezi vzduchem a mědí bude trvat určitý čas. Z tohoto důvodu bylo potřeba zajistit měření teploty uvnitř měděné kostky, a to je zajištěno optickým systémem DTS.

Distributed temperature system, tak zní doslovný název tohoto zařízení, jež je schopné využít jako zdroj pro měření optické vlákno, což je velice výhodné, protože k proměřovaným, experimentálním erbiem dopovaným vláknům, je uvnitř kostky namotáno jedno vlákno navíc, které je využito zařízením DTS k měření teploty. Vlákno pracuje jako distribuovaný senzor, což je druh snímače, který neměří pouze v jednom bodě, jako teplotní sonda uvnitř mrazicího přístroje, ale snímá teplotu po celé délce optického vlákna, připojeného k systému DTS. Tím jsme schopni monitorovat teplotu v jednotlivých úsecích. Protože vlákna jsou namotána v měděné kostce v soustředných kruzích, získáme tak vývoj teploty uvnitř kostky několikrát ze stejného bodu. Délka vlákna, které plní funkci teplotního snímače uvnitř kostky, činí přibližně 20 metrů.

Činnost DTS je založena na reflektometrii v časové oblasti OTDR, neboli Optical time domain reflectometry. Vše pracuje tak, že DTS vysílá optický impuls skrz senzorické vlákno. Ten má vlnovou

délku 1064 nanometrů a výkon menší než 1mW, přičemž čas jeho trvání je 10 nanosekund. Takto vytvořený puls putuje přes senzorické vlákno. Velikost doby, po kterou je impuls vysílán, lze ovšem libovolně měnit. Tím je možné také nastavit vzdálenost, potažmo délku vlákna, na které lze udělat objektivní náměry. Nevýhodou je fakt, že čím delší impuls se vysílá, tím méně přesné měření je. Avšak při nutnosti proměřit dlouhou trasu po celé její délce, nezbyvá nic jiného, než impuls v čase prodloužit. Díky Ramanovu a Brillouinovu rozptylu, které jsou povětšinou vnímány v komunikacích jako parazitní jevy (výjimku tvoří Ramanův optický zesilovač, který funguje na principu Ramanova stimulovaného rozptylu), se část takto vyslaného pulzu vrátí zpět k DTS systému, který jej pomocí detektoru přijme. Následně vyhodnotí z přijatého signálu teplotu optického vlákna a to po celé jeho délce. DTS systémy se odlišují podle toho, který z výše zmíněných, nelineárních rozptylů, využívají k měření teploty. Nutností při využití DTS a obecně kteréhokoliv zařízení, pracujícího na OTDR principu, je využít předřadné vlákno, které se zapojí před senzorické vlákno. To je třeba udělat z důvodu existence mrtvé zóny, což je určitá vzdálenost od zdroje signálu, po kterou není možné měřit vlastnosti vlákna. Tato zóna je dlouhá od jednotek až po desítky metrů a je nutno s ní počítat. Předřadné vlákno tedy slouží k překlenutí mrtvé zóny.

Pokud DTS systém pracuje na principu Ramanova rozptylu, využívá zpravidla mnohavidové optické vlákno s průměrem 50 μm , či 62,5 μm s pokud možná nejvyšší hodnotou numerické apertury, která hraje důležitou roli k dosažení co pokud možná nejvyšší intenzity záření rozptýleného paprsku, který se vrací zpátky k DTS. Intenzita zpětně rozptýleného Ramanova paprsku je poměrně nízká, proto tyto systémy dokážou pracovat pouze na omezenou vzdálenost, přibližně do deseti kilometrů. DTS systémy využívající Brillouinova rozptylu dokážou překlenout až 30km.

Při nasazení DTS jsme schopni v daný okamžik přesně určit teplotu měřených vláken a v případě potřeby nastavit termostat mrazícího přístroje k dosažení požadované teploty. Tím jsme schopni během měření nastavit požadovanou teplotu a stabilizovat ji.

Pro účely experimentálního měření je využit měřicí systém DTS, od firmy Sensornet, sídlící ve Velké Británii. Označení produktu je Sentinel DTS-LR, který pracuje s využitím Ramanova nelineárního rozptylu. Zkratka LR označuje Long range. V následující tabulce je soupis základních parametrů tohoto zařízení.

Tabulka 1.6: *Parametry měřicího DTS systému*

<i>Parametr</i>	<i>Hodnota</i>
<i>Přesnost měření teploty</i>	$\pm 0,2\text{ }^{\circ}\text{C}$
<i>Interval měření</i>	15 - 1800 s
<i>Krok měření</i>	1 m
<i>Maximální překlenutelná vzdálenost</i>	10 km
<i>Rozlišení teploty</i>	$\geq 0,01\text{ }^{\circ}\text{C}$
<i>Délka předřadného vlákna</i>	20 km

Následující obrázek zachycuje vzhled DTS systému. Jak je patrné, vypadá jako stolní Desktop počítač, ovšem disponuje optickým rozhraním a laserem, který je schopen emitovat požadovaný puls. Laserový výstup je pak připojen do předřadného vlákna a pak dále do měřené trasy, tedy do měřené kostky s navinutými dvaceti metry senzorického vlákna.



Obrázek 4.7: Měřicí systém DTS

4.1.4 Energetické zásobování zesilovače

Jak již bylo zmíněno v teoretické části, optický, erbiem dopovaný vláknový zesilovač, stejně jako každý jiný zesilovač, potřebuje k své funkci zdroj energie. Tou pak dotuje nosný signál. Protože jsou xDFA zesilovače schopny zesilovat signál přímo v optickém spektru pomocí LR obnovy, využívají k dodávce energie optické pumpy. Jinými slovy, jedná se o laserové zdroje, které dodávají zesilovači energii již ve světelné formě.

Pro experimentální měření byly využity dva typy pumpovacího laseru. Prvním je laser vyrobený firmou Pirelli s označením E2-980, který je schopen dodávat optický výkon maximálně do hodnoty 125mW. Protože je třeba optická vlákna vybudit na dostatečnou úroveň, aby bylo možné posoudit jejich chování v závislosti na teplotě, je třeba, aby byl pumpovací laser schopen dodat větší množství výkonu. Druhá pumpa, která byla využita, je od výrobce Oclaro, s označením II-VI LC96A74P-20R, která je schopna dodávat světelné záření EDF vláknům až do 600mW. Obě pumpy dodávají výstupní elektromagnetické záření o vlnové délce 980 nanometrů.

Stejně, jako každý laser, i pumpovací lasery je potřeba napájet energií. K tomu slouží adaptér od firmy Thorlabs, s kódovým označením LM14S2, do kterého se pumpa umístí. Adaptér představuje tedy pouzdro, které je vybaveno dvěma sériovými porty, k připojení teplotního a proudového kontrolního zařízení. Stejně tak, jako každý laser, i pumpovací lasery je nutno teplotně stabilizovat, aby nedocházelo k jejich rozladění a aby dodávaly záření o stále stejné vlnové délce, což je důležité pro splnění funkčních principů EDF vláken. K tepelné stabilizaci laseru bylo využito zařízení opět od firmy Thorlabs, s označením TED200C, přičemž teplota po celou dobu měření byla ustálená na 10 stupňů Celsia. Proudový zdroj slouží k nastavení výstupního výkonu laseru, tím jsme schopni regulovat vybuzení experimentálních erbiových vláken. K tomu jsme opět využili produkt od firmy Thorlabs, s označením LDC205C, který umožňuje regulaci proudu v rozmezí hodnot od 0 až do 500mA. Díky tomu, že proudové kontrolní zařízení je schopné dodávat pouze takové množství proudu, nejsme schopni plně pokrýt výkonové rozpětí pro laser LC96A74P-20R a proto jsme byli nuceni proměřovat výkony maximálně do 325mW. V následující tabulce je soupis parametrů jednotlivých laserových pump při teplotě 25 stupňů Celsia.

Tabulka 1.7: *Parametry pump*

Parametr	Pirelli	Oclaro
<i>Výkon [mW]</i>	125	600
<i>Prahový proud [mA]</i>	20.4	40
<i>Proud v propustném směru [mA]</i>	221.56	1200
<i>Smyčkový proud [mA]</i>	258	-
<i>maximální vlnová délka [nm]</i>	976.6	974

Optický signál vystupující z pumpy a užitečný signál, který má být zesílen, se následně musí přivést do zesilovacího vlákna. Aby tohoto bylo možno dosáhnout, je třeba využít spojovací článek. Ten představuje prvek, do něhož vstoupí separátně oba signály a na výstupu je jedno vlákno, ve kterém se pak tyto signály nachází. Protože vlnová délka signálů je navzájem rozdílná, nedojde tak ke vzájemné interferenci. V rámci měření byl využit WDM slučovač s integrovaným izolátorem, který slouží k tomu, aby zamezil zpětným odrazům. Parametry se nachází v následující tabulce:

Tabulka 1.8: *Parametry WDM slučovače*

Parametr	Hodnota
<i>Provozní vlnová délka [nm]</i>	980/1550
<i>Vložný útlum při 980nm [dB]</i>	0.45
<i>Vložný útlum při 1550nm [dB]</i>	0.44
<i>Minimální izolace při 980nm [dB]</i>	65
<i>Minimální izolace při 1550nm [dB]</i>	30
<i>Směrovost [dB]</i>	59
<i>PDL [dB]</i>	0.05
<i>TDL</i>	0.12
<i>Útlum odrazu [dB]</i>	53
<i>Typ konektoru</i>	SC-APC
<i>Provozní teplota [$^{\circ}\text{C}$]</i>	0 -70

4.1.5 Experimentální Erbiem dopovaná optická vlákna

K experimentálnímu měření jsme využili erbiová zesilovací vlákna, která jsou dodána pro účel experimentálního měření a byla dříve využita k testování v oblasti kladných teplot. Pochází z výzkumného centra Fiber Optics & Photonics Division Central Glass & Ceramics Research Institute z Kalkaty v Indii. Dodal je Dr. Dhara. Každé z vláken bylo dodáno o délce 20 metrů, posléze zkráceno na požadovanou délku v souladu s jejich parametry a experimentálním měřením. Protože se jedná o experimentální vlákna, není možné zjistit jejich úplnou specifikaci.

Klasická erbiová vlákna poskytují největší zesílení v oblasti vlnových délek 1530 nanometrů, ovšem experimentální vlákna dodaná z Kalkaty, mají svou typickou zesilovací křivku posunutou přibližně o 20 nanometrů směrem k L pásmu, tedy k vyšším vlnovým délkám. Tato vlákna nejsou svým účelem stavěna na běžné použití, ale slouží čistě k experimentálnímu testování. V praxi se takovéto posunutí zesilovací křivky u běžných erbiových vláken provádí naddimenzováním jejich délky. Typická délka vláken při nasazení se pohybuje v jednotkách metrů, pro posunutí do L pásma se nasadí vlákno často o několik desítek až stovek metrů delší. V následující tabulce je soupis všech

parametrů, které bylo možno získat a které byly poskytnuty výzkumným centrem, kde byla vlákna vyrobena. Hodnota délky vlákna je totožná s délkou, která se nachází uvnitř měděné kostky. Pro vlákno SAE1 byla ideální hranice výzkumným centrem stanovena na 10-12 metrů. Vlákna SGAE pak mají tuto délku stanovenou na 15 metrů. V úvahu je nutno vzít také to, že veškeré hodnoty, zaznamenané v tabulce, jsou pouze orientační. Z tohoto důvodu byla tato vlákna zkrácena na délku, která odpovídá maximální hodnotě výkonu signálu, který byl experimentálně naměřen.[25]

Tabulka 1.9: *Parametry experimentálních měřených EDF vláken*

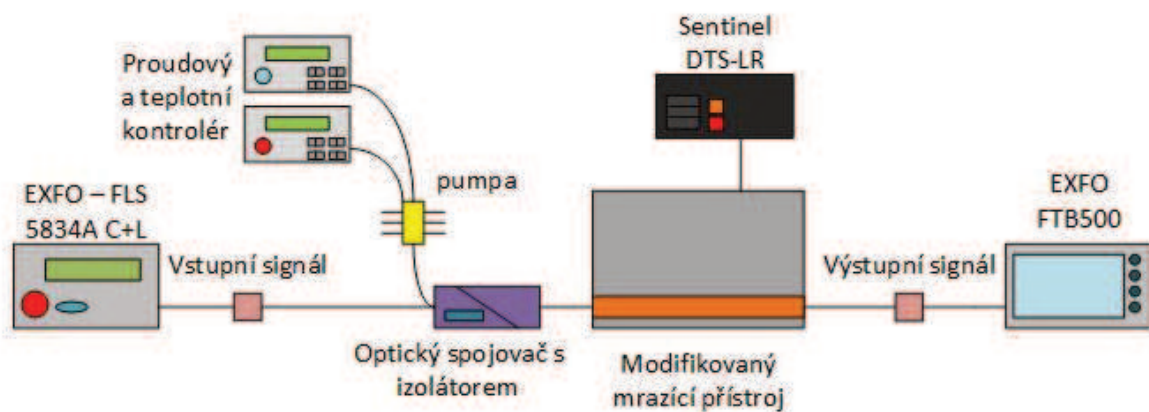
Parametr	Vlákno		
<i>ID vlákna</i>	SAE-1	SGAE-1	SGAE-2
<i>Složení pláště</i>	SiO ₂ -P ₂ O ₃ -F	SiO ₂ -P ₂ O ₃ -F	SiO ₂ -F
<i>Složení jádra</i>	SiO ₂ -Al ₂ O ₃ -Er ₂ O ₃	SiO ₂ -GeO ₂ Al ₂ O ₃ -Er ₂ O ₃	SiO ₂ -GeO ₂ Al ₂ O ₃ -Er ₂ O ₃
<i>Průměr jádra [μm]</i>	5.2	3.9	5
<i>Numerická apertura</i>	0.15	0.2	0.17
<i>Útlum při 980nm [dB/m]</i>	10	5	6
<i>Útlum při 1530nm [dB/m]</i>	20	10	12
<i>Délka vlákna [m]</i>	10	15	14
<i>Množství dopandů [Er³⁺/cc]</i>	188771 x 10 ¹⁶	9438.5 x 10 ¹⁶	11326 x 10 ¹⁶

5 Měření tepelného vlivu na experimentální Erbiem dopovaná optická vlákna

Veškerá zařízení, komponenty a jejich specifikace, uvedené výše, byly následně využity k sestavení měřicího pracoviště, pomocí kterého lze testovat experimentální, Erbiem dopovaná vlákna s využitím tepelné zátěže. Rozsah teplot, ve kterém byla vlákna proměřována, je od 25 až do -17.5 stupňů Celsia. Jako zdroj optického signálu byl využit širokospektrální optický vysílač, který vysílá signál v spektru vlnových délek v rozmezí 1520 až 1620 nanometrů, čemuž odpovídají C a L optická pásma.

Signál samotný nepředstavuje přenos užitečných dat, reálně se jedná o pouhý šum, který je pak následně zesilován zesilovacími vlákny. Díky tomu je možné sledovat výkonovou křivku každého z vláken, v průběhu jeho buzení optickou pumpou a také teplotní vliv. Jelikož jde o šum, šířící se od zdroje, zesilovač jej zesiluje, což vede k faktu, že se jedná o zesílení spontánní emise, neboli ASE.

Následující obrázek zachycuje použité schéma měřicího pracoviště.



Obrázek 5.1: *Blokové schéma měřicího pracoviště v C a L pásmu*

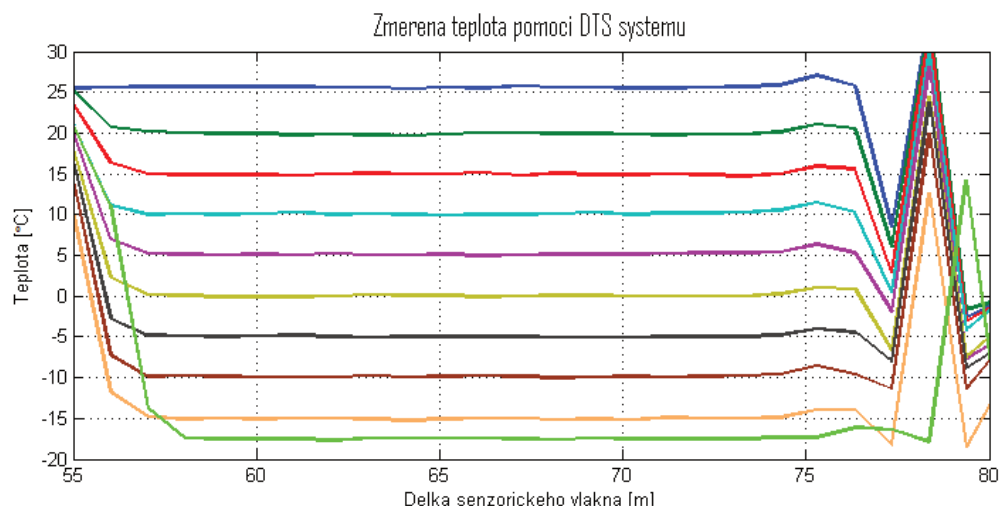
Následující tabulka obsahuje základní parametry použitého optického signálového zdroje, jehož výstupní elektromagnetické záření bude zesilováno EDF vlákny, která se nacházejí v měděné kostce uvnitř mrazicího přístroje.

Tabulka 1.10: *Parametry širokospektrálního zdroje*

Parametr	Hodnota
Výstupní výkon [dBm]	4
Středová vlnová délka [nm]	1580±10
Stabilita výkonu [dB]	<0.075
Odstup signálu od SSE	≥45
Provozní teplota [°C]	0-40

Samotné měření probíhalo ve dvou fázích. Zpočátku byla zapojena pumpa Pirelli a pomocí mrazicího přístroje postupně, od pokojové teploty 25 až po -17.5 stupňů Celsia byla experimentální

vlákna podchlazována. Následně se vyměnil laser pumpy a měření se opakovalo. Pro každé z vláken a pro každou teplotu se postupně nastavoval výkon pumpy od 0 do 325mW s krokem 25mW a pomocí spektrálního analyzátoru se zaznamenávala jednotlivá výkonová optická spektra. Teplota, která byla uvnitř kostky, byla monitorována DTS systémem, z něhož se pak příslušné teplotní grafy zaznamenávaly a také ukládaly. Veškeré náměry byly poté zpracovány pomocí programu Matlab. Následující obrázek znázorňuje teploty, které byly nastaveny pomocí termostatu a následně změřeny uvnitř měděné kostky pomocí DTS.



Obrázek 5.2: Změřené hodnoty teploty systémem DTS

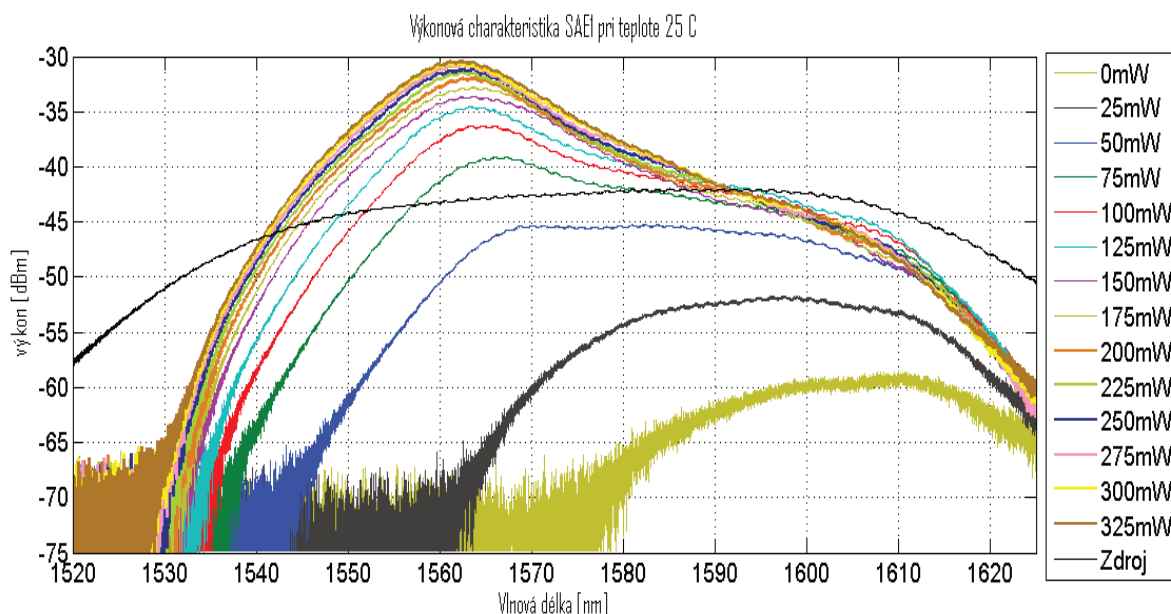
Jak je patrné z obrázku, všechny teploty se podařilo v průběhu měření stabilizovat s odchylkou maximálně půl stupně. Teplota uvnitř mrazicího přístroje byla ve většině případů přibližně o pět stupňů Celsia menší. Výparník ochlazoval vzduch v jeho vnitřním prostoru a ten pak ochlazoval měděnou kostku. Tento proces byl časově náročný. Pokles teploty o pět stupňů, trval až dvě hodiny. Doba, kterou trvalo ochladit vlákna z pokojové teploty 25 stupňů Celsia na nejnižší možnou teplotu, kterou mrazicí přístroj dosáhl, to je -17.5 stupňů Celsia, činila přibližně 6 hodin nepřetržitého ochlazování.

5.1 Experimentální měření EDF vláken v C a L pásmu

5.1.1 Experimentální vlákno SAE-1

Prvním vláknem, které bylo testováno, je experimentální vlákno SAE-1. Na obrázku za textem je zachycena vybraná výkonová charakteristika pro pokojovou teplotu 25 stupňů Celsia. Je na ni velmi dobře patrné, že na rozdíl od konvenčních EDF vláken, je výkonová charakteristika posunuta směrem k vyšším vlnovým délkám, potažmo tedy k nižším frekvencím elektromagnetického záření. Běžná erbiová vlákna dosahují maxima, které je v tomto případě v okolí hodnoty 1562 nanometrů, mezi 1530 až 1535nm. Tato skutečnost je přisuzována samotným parametrům vlákna. Je také dobře viditelný výkonový růst v závislosti na dodávaném výkonu pumpy. Zatímco při nulovém výkonu je vidět ve spektru pouze slabý signál zdroje, v L pásmu o hodnotě přibližně -65dBm, v C pásmu je signál utlumený a to proto, že v okolí 1530 nanometrů vykazuje značný útlum o přibližné hodnotě 20 dB na jeden metr. Aby vlákno vykazovalo zisk, je nejprve nutno jej dostatečně vybudit, dosáhnout hraniční hodnoty intenzity pumpy tak, aby bylo dosaženo inverze populace u většiny erbových iontů. Po

zvýšení výkonu pumpy na 25mW a poté na 50mW je vidět markantní zvýšení výkonu signálu ve spektru. Zpočátku je tento nárůst patrný v L pásmu, následně se pak ovšem začne objevovat i v pásmu C. Po dosažení výkonové hranice 75mW je pak patrné, jak se začíná formovat globální maximum tak, jak je to typické pro EDFA zesilovače. Současně ve stejné oblasti, tedy 1560 až 1570 nanometrů, vlákno začíná vykazovat zisk oproti signálu ze zdroje, který má napříč spektrem hodnotu výkonu v rozmezí od -45dBm po -40dBm. Další navýšení výkonu pumpy již nemá tak markantní dopad na výstupní signál zesilovače, nicméně i tak je stále patrný nárůst výkonu výstupního signálu a tím i úměrně rostoucí hodnota zisku. Ten má při dosažení výkonu pumpy 325mW přibližnou hodnotu 13dBm. Při této výkonové úrovni pumpy je dále zesilovač schopen vykazovat zisk vstupního signálu v rozmezí vlnových délek 1542 až 1590 nanometrů. V L pásmu je pak vidět malý rozdíl od hranice 100mW. S rostoucím výkonem výkonová křivka klesá, tedy vlákno vykazuje rostoucí úbytek výkonu oproti předcházejícímu výkonu. Jedná se tedy o celkový pokles výkonu vůči vstupnímu signálu. V této oblasti zisk klesá, jedná se ovšem o rozdíl, který činí 1-3dBm. Naopak v pásmu optických délek C je patrné, že s vyšší úrovní výkonu pumpy se neustále zvyšuje i výkon výstupního signálu ze zesilovače.

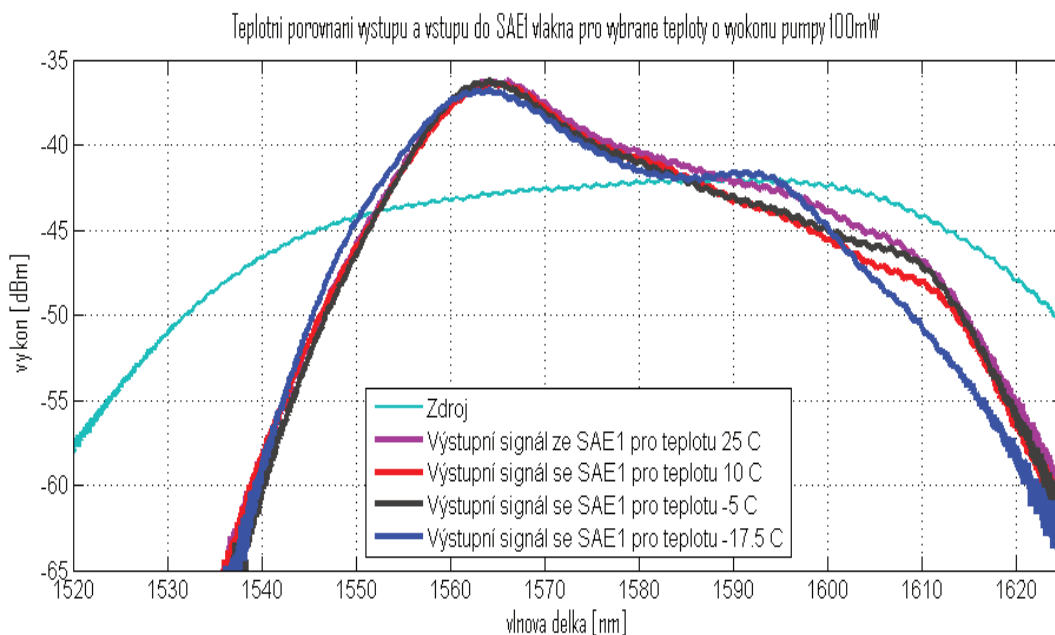


Obrázek 5.3: Výkonová charakteristika SAE1 při teplotě 25°C

Následující obrázky znázorňují chování zesilovače při působení rozdílných teplot na zesilovací vlákna s výkonem signálu pumpy 100mW a 325mW. K dostatečnému znázornění byly vybrány teploty 25, 10, -5 a -17.5 stupňů Celsia.

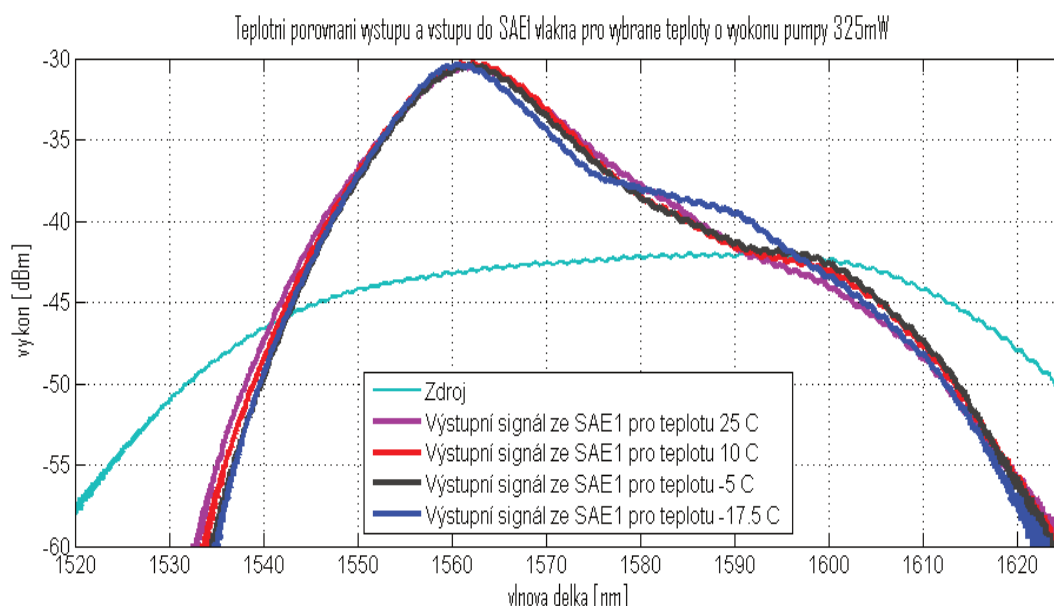
Je patrné, že teplota se významně neprojevila v pásmu vlnových délek C. Rozdíly výkonu pro jednotlivé teploty a potažmo tedy i zisku jsou minimální. Nicméně přesně tak, jak předpokládá teorie, s klesající teplotou se výkon v oblasti nižších vlnových délek, konkrétně tedy pro vlnové délky do hodnoty 1541nm, snižuje. Pak ovšem rychle přeroste signál šířící se při jiné teplotě a své globální maximum lehce posouvá směrem k nižším vlnovým délkám; jedná se o jednotky nanometrů. Teplotní rozdíl je ovšem patrnější v L pásmu, kde signál s klesající teplotou nejdříve snižuje i svůj výkon, což je přehledně patrné na červené křivce, reprezentující teplotu deset stupňů. Nižší teplota ovšem způsobuje v této oblasti vznik lokálního maxima, které je výraznější s nižší teplotou. První náznak je viditelný na černé křivce, představující teplotu pěti stupňů Celsia pod nulou. Následně je tento rozdíl

markantnější při nejnižší teplotě, které bylo dosaženo modrou křivkou, to je při -17,5 stupních Celsia, kde na vlnové délce 1593nm je vidět lokální maximum o výkonu srovnatelném s vstupním signálem, tedy signálem zdroje. V ostatních případech je ovšem po překročení hranice vlnové délky 1583 nanometrů zisk záporný, čili vlákno signál tlumí. Dále pak modrá křivka prudce klesá a po překonání vlnové délky 1602 nanometrů je výkon nižší než v případě ostatních teplot. Modrá křivka dále v L pásmu, po dosažení lokálního maxima, vykazuje pokles výkonu oproti nejvyšší teplotě až o 4dBm.



Obrázek 5.4: *Teplotní charakteristika výstupu a vstupu do SAE1 vlákna pro vybrané teploty o výkony pumpy 100mW*

Na následujícím grafu je vidět situace, kdy pozorované teploty zůstávají stejné, ovšem výkon jdoucí z pumpy je na maximální úrovni, tedy 325mW. Vývoj je opět podobný, jako v předchozím případě. Je vidět, že dostatečně vybuzené vlákno, vykazuje globální maximum posunuté směrem k nižším vlnovým délkám přibližně o 2 nanometry a zisk, proti dotování o výkonu 100mW, se zvýšil o téměř 6dBm. Lokální maximum v L pásmu vzrostlo z hodnoty -42dBm na -39dBm. Modrá křivka pak ukazuje, že situace v C pásmu je stejná, jako v minulém případě do dosažení vlnové délky 1550 nanometrů. Signály, šířící se na nižší teplotě, vykazují nižší výkon, následně pak rychle předchází signály šířící se o vyšší teplotě a globální maximum je opět posunuto stejně tak, jako v případě buzení 100mW. Výkonový rozdíl mezi nejnižší a nejvyšší teplotou od hranice 1600 nanometrů pak nečiní rozdíl, který by stál za povšimnutí. Před touto hranicí je ovšem tento průběh naopak nejvyšší, kdy signál, šířící se při teplotě 25 stupňů Celsia, má téměř o 3dBm výkon nižší, než signál při teplotě -17,5 stupňů Celsia. Rozpětí vlnových délek v optickém spektru, uvnitř kterého vlákno vykazuje kladný zisk, se pohybuje od 1542 do 1590nm, což je celkově 48 nanometrů. Další patrný průběh, způsobený teplotní změnou, který je dobře viditelný a opět predikovaný podle teorie, je oblast od 1562nm do 1577nm. V tomto pásmu, po dosažení globálního maxima, signál, který se šíří vláknem při nižší teplotě, vykazuje menší výkon v porovnání s ostatními signály, šířícími se vláknem při vyšší teplotě.



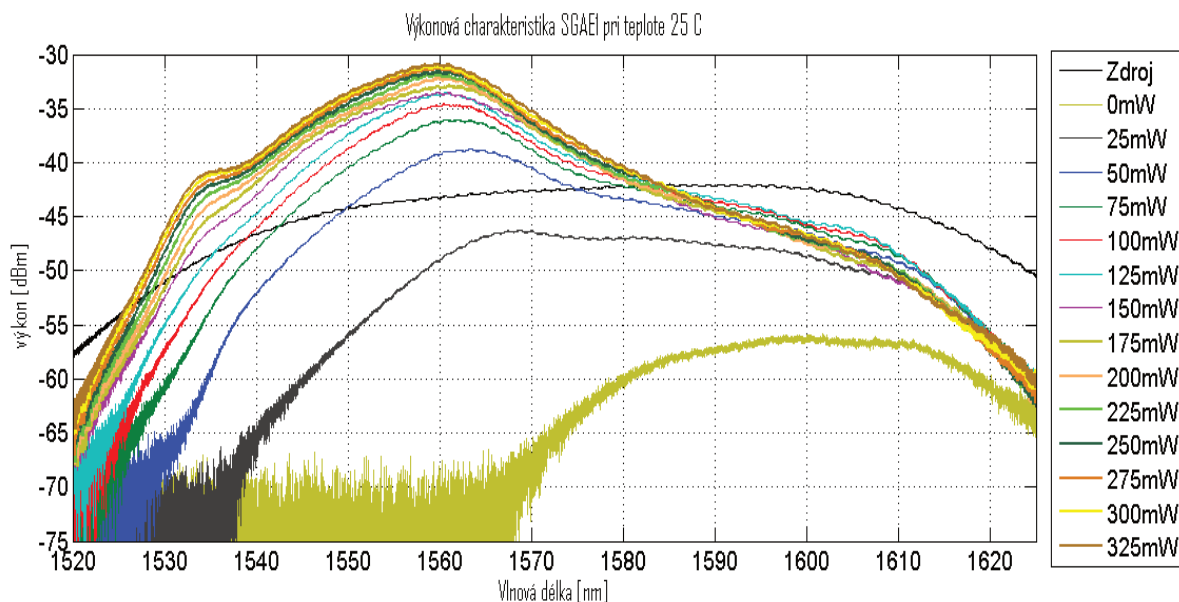
Obrázek 5.5: *Teplotní charakteristika výstupu a vstupu do SAE1 vlákna pro vybrané teploty o výkony pumpy 325mW*

Vliv teploty na přenášený výkon tohoto vlákna se naměřenými údaji jeví jako málo významný, neboť se jedná o rozdíly řádově v jednotkách dBm. Na druhou stranu vliv jednotlivých fyzikálních veličin na chování vlákna je přesně takový, jaký lze očekávat po prostudování teoretických technických ukazatelů.

5.1.2 Experimentální vlákno SGAE-1

Následujícím experimentálním vláknem, jehož parametry, měnící se v závislosti na teplotě a výkonu pumpy byly zkoumány, je vlákno s označením SGAE-1. Obrázek pod textem obdobně, jako tomu bylo v případě SAE-1, zachycuje výkonovou charakteristiku testovaného vlákna pro teplotu 25 stupňů Celsia. Bez dodání jakéhokoliv výkonu pumpy se vlákno chová podobně, jako ostatní vlákna, tedy C pásmo je utlumené a k vidění je pouze šum, naopak L pásmo vykazuje jistou výkonovou úroveň, ovšem proti signálu, který jde ze zdroje, je výstupní signál tlumen. Hodnota výkonu činí 55 dBm. V tomto případě však vlákno vykazuje kladný zisk již při pumpování o výkonu 50 mW a typický tvar výkonové křivky je patrný při dopování právě o takovémto výkonu. Je to způsobeno tím, že má výrazně nižší útlum v okolí 1530 nanometrů, a to 10 dB. Při dopování výkonem 150 mW, je v oblasti C pásma, v rozmezí od 1530 do 1540 nanometrů vidět, jak postupně vzniká lokální maximum, které je pro toto vlákno specifické a je dáno samotnými materiálovými vlastnostmi. Z tohoto důvodu, je vlákno schopné, při dostatečném vybuzení, vykazovat v tomto rozsahu také kladný zisk, což je pro toto vlákno charakteristické. Globální maximum se vyskytuje obdobně jako u předešlého vlákna v oblasti 1560 nanometrů. Co se týká L pásma, je ve všech případech stejně, jako i u ostatních vláken, spíše utlumené, než aby došlo k nárůstu výkonu na výstupu vlákna. Avšak je patrné to, že rozptýl výkonů jednotlivých signálů se v této oblasti snižuje. Tak je tomu i u ostatních experimentálních vláken. V tomto případě hranice, kdy vlákno ještě určitý zisk vůči vstupnímu signálu vykazuje, je v oblasti vlnové délky 1580 nanometrů. Ovšem toto neplatí v případě, kdy vlákno budíme výkonem 50 mW a méně, kdy je hodnota a spektrum, ve kterém je zisk vykazován menší, či naopak vlákno není dostatečně vybuzeno a vstupní signál tlumí. Maximálního dosaženého zisku při výkonu pumpy

325mW jsme dosáhli na vlnové délce 1560nm. Jeho hodnota činí cca 13dBm. Od hodnoty dodávané energie 75mW zářením pumpy, se zpočátku prudký růst výstupního výkonu zmenší. Obdobně je tomu v případě vlákna SAE-1. Vláknem je dostatečně vybudeno a dostává se do bodu nasycení. Intenzita záření pumpy je natolik vysoká, že je zajištěna dostatečná hodnota inverze populace a vlákno zesiluje výstupní signál. To se děje ovšem především v C pásmu, L pásmo je, jak již bylo zmíněno, postupně ve spektru utlumováno.

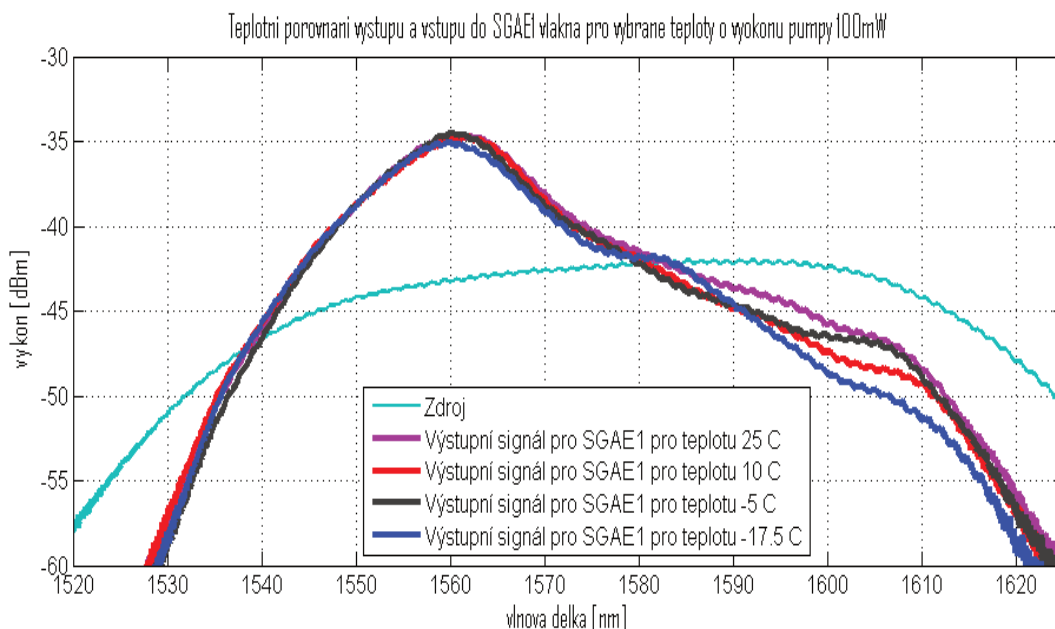


Obrázek 5.6: Výkonová charakteristika SGAEI při teplotě 25°C

Následující obrázky ukazují jak se chová zesilovač při působení rozdílných teplot na zesilovací vlákna s výkonem signálu pumpy 100mW a 325mW. K dostatečnému znázornění byly vybrány teploty 25, 10, -5 a -17.5 stupňů Celsia.

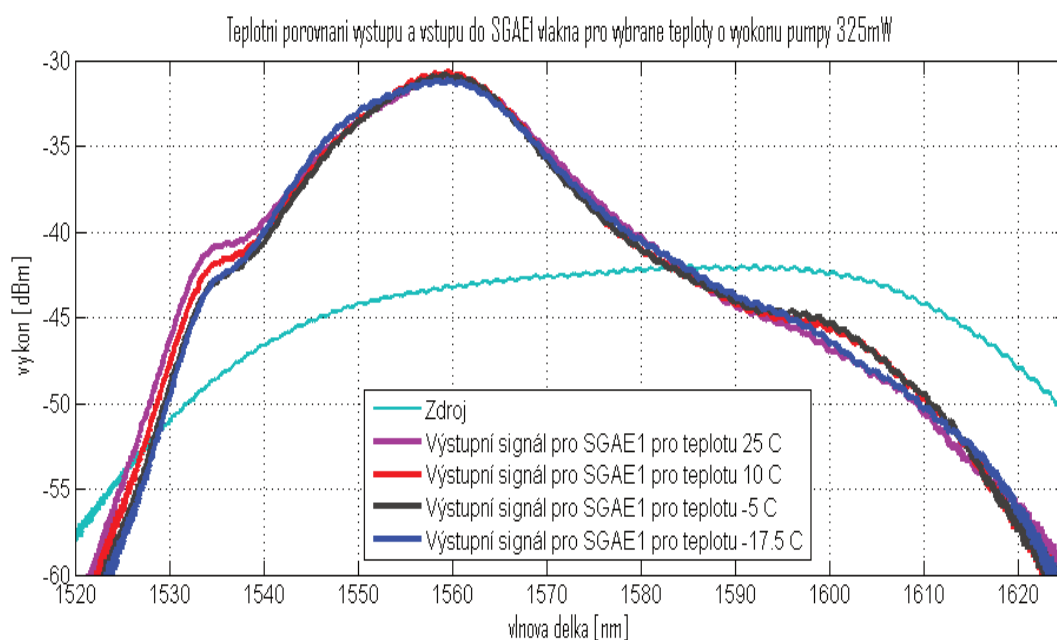
Při pohledu na další obrázek v řadě vidíme, že stejně jako v předcházejícím případě, tak i při testování tohoto vlákna, se teplota nikterak významně neprojevuje v pásmu vlnových délek C. I přesto je ale patrné, jak se při nižších teplotách signál zpočátku jeví více utlumený, než je tomu při teplotách vyšších. Tento rozdíl je však velmi malý. Globální maximum se opět posunuje směrem k nižším vlnovým délkám, opět jde ale o desetiny až jednotky nanometrů. Větších rozdílů ve spektru je dosaženo zejména v L pásmu. Zde je patrné, že křivka pro teplotu 25 stupňů Celsia vykazuje nejmenší pokles. Po překonání vlnové délky 1580 nanometrů je výkon ztrátový proti vstupnímu signálu. Červená křivka představující teplotu o 15 stupňů Celsia nižší, svůj pokles v L pásmu zachovává, nicméně rozdíl oproti křivce při 25 stupních Celsia je přibližně 2 až 3dBm. Při pohledu na další křivku černé barvy, reprezentující teplotu -5 stupňů Celsia, je vidět, stejně jako v případě vlákna SAE1, že se začíná objevovat lokální maximum, které je ovšem posunuté směrem k delším vlnám o 10 nanometrů, tedy od 1600 až po 1610nm. Svou výkonovou velikostí dorovnává křivku signálu fialové barvy, naměřené při 25 stupních Celsia. Pak ovšem podobně, jako u červené křivky, úroveň výkonu klesá strměji, a proto po překonání hranice 1610 nanometrů je výkon nižší, než v případě teplot vyšších. Největších rozdílů bylo dosaženo při teplotě -17,5 stupňů Celsia, kdy lokální maximum v pásmu L je naměřeno v oblasti 1582 nanometrů, čímž dorovnává křivku teploty 25 stupňů Celsia. Následuje ovšem strmý pokles, čímž se tato křivka ze všech ostatních křivek stává nejméně výkonnou.

V části spektra od vlnové délky 1605 až po 1610 nanometrů vykazuje nejmarkantnější výkonovou ztrátu proti křivce pro 25 stupňů Celsia. Tato ztráta činí až 4dBm. Při pumpování optického záření o výkonu 100mW lze tedy tvrdit, že vlákno se chová tak, jak předpokládají teoretické analýzy. Maximální zisk proti vstupnímu signálu je zde 13dBm.



Obrázek 5.7: Teplotní charakteristika výstupu a vstupu do SGAE1 vlákna pro vybrané teploty o výkonu pumpy 100mW

Následující graf, zachycený na obrázku, představuje stejné vlákno, stejné teploty, ovšem rozdílný výkon pumpy tak, jak to bylo uvedeno výše, pro vlákno SAE1. Výkon dodávaný zesilovacímu vláknu k zesílení vstupního signálu je obdobně 325mW. Zde je patrný větší teplotní vliv v C pásmu oproti výkonu s hodnotou 100mW. Vidět je, jak se nižší teplota, projevuje na nižším výkonu, při dané vlnové délce. Důvodem je vznik lokálního maxima v části spektra od 1530 až do 1540nm. Naopak druhé lokální maximum v L pásmu, které se nyní nachází v rozmezí 1590 až 1600 nanometrů, bylo patrnější při 100mW výkonu. Nyní je uhlazenější a méně patrné, ovšem stále existuje. Dalo by se říci, že teplotní vliv v pásmu L není až tak významný, ve srovnání s C pásmem. Tento fenomén je patrný teprve až při testování tohoto vlákna. Jak již bylo zmíněno, lokální maximum, které se generovalo v pásmu C, umožnilo zesílení v širším rozpětí vlnových délek, než tomu je u vláken SAE1 a SGAE2. Výkonové rozdíly, způsobené vlivem teploty, podobně jako v případě vlákna SAE1, nejsou tak markantní vzhledem k tomu, že vlákno je již vybuzené a nachází se v bodě nasycení, oproti případu dopování výkonem 100mW. Svou roli hraje taky fakt, že obecně přírůstek výkonu po překonání hranice pumpy 75mW se již neprojevuje tak, jak je tomu v případě buzení vlákna. Při pohledu na část spektra od vlnové délky 1610 nanometrů je vidět, že křivky, představující signály, šířící se při působení nižších teplot, klesají strměji a způsobují rychlejší úbytek výkonu. Maximální výkonový rozdíl v C pásmu, způsobený teplotou, je patrný mezi teplotami v rozmezí od 25 do -17,5 stupňů Celsia a představuje hodnotu maximálně 3dBm. V L pásmu je pak pro stejné teploty tento rozdíl nejpatrnější v oblasti vlnových délek 1600 až 1610 nanometrů, v místě, kde se nachází druhý lokální extrém. Rozdíl bude v tomto případě ovšem nižší, jedná se o hodnotu maximálně 2dBm.



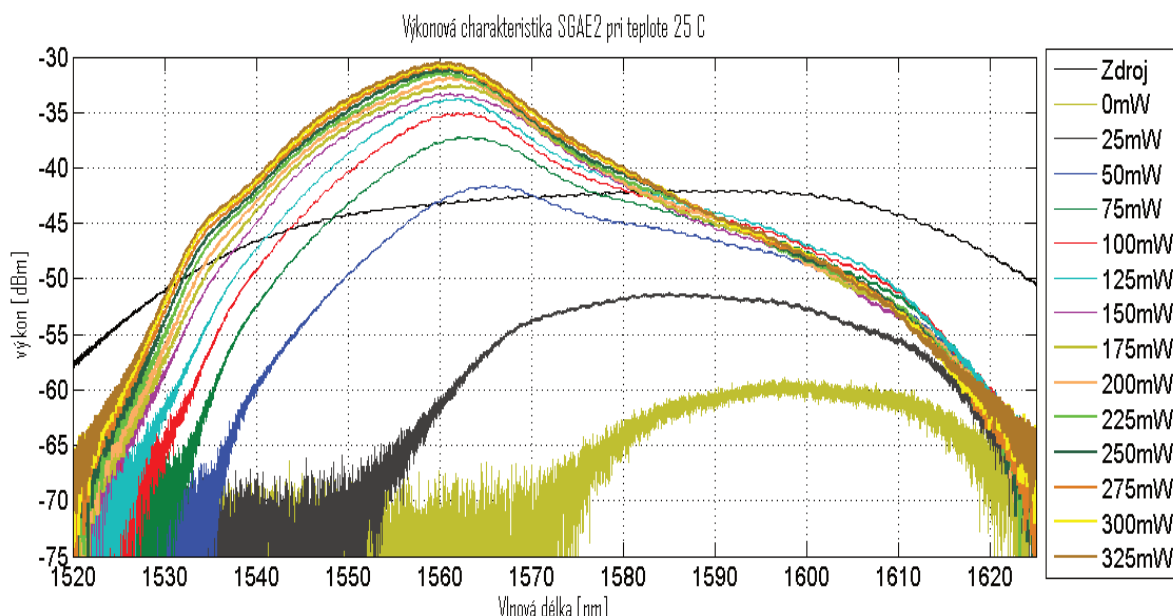
Obrázek 5.8: Teplotní charakteristika výstupu a vstupu do SGAE1 vlákna pro vybrané teploty o výkonu pumpy 325mW

Vliv teploty ani při testování tohoto experimentálního vlákna není významný, podobně jako je tomu v případě vlákna SAE1. Vývoj vlivu teploty se ani v tomto případě příliš nerozchází s tím, jak jej popisuje teorie.

5.1.3 Experimentální vlákno SGAE-2

Po testování a měření experimentálních vláken SAE1 a SGAE1 následuje z měřených vláken vlákno poslední, které je označeno jako SGAE2. Toto vlákno je svými vlastnostmi více podobně SGAE1. V následujícím obrázku je opět výkonová charakteristika pro jednotlivé výkonové úrovně pumpy při teplotě 25 stupňů Celsia. Jak je možné vidět z Obrázku na první pohled i v tomto případě dosahuje vlákno v případě dostatečného vybudení výkonem od 220mW lokálního maxima v C pásmu vlnových délek. Hodnota výkonu se pohybuje v oblasti -45dBm, čímž lze tvrdit, že na této vlnové délce vlákno vykazuje zisk přibližně 3dBm. Stejně tak jako v případě vlákna SGAE1 i toto vlákno již při dopování pumpou o výkonu 75mW dosahuje zisku v oblasti 1560-1570 nanometrů. Také již při tomto výkonu lze pozorovat vznikající typický tvar výkonové křivky pro EDF vlákna. Dále od výkonu pumpy 75mW je opět vidět jak se nárůst výkonu snižuje a vlákno se dostává do bodu, kdy je dostatečně vybudené, inverze populace dosahuje své maximální hodnoty a stimulovaná emise probíhá po celé délce vlákna. Při pumpování výkonem o velikosti 325mW jsme dokázali vlákno vybudit nejvíce a je patrné, že maximální zisk je opět proti standardním erbiem dopovaným vláknům posunutý přibližně o 20nm směrem do L pásma, zisk činí 13dBm. a zesílení vstupního signálu vlákno vykazuje v rozsahu 1530 až 1584 nanometrů. V případě L pásma je obecně vidět, že od hranice vlnové délky v okolí 1583nm signály pro všechny jednotlivé teploty svůj výkon ztrácí a začínají signál jdoucí ze zdroje naopak utlumovat. V tomto bodě se stává zisk záporný. Rozptyl hodnot výkonů výstupních signálů pro jednotlivé výkony pumpy je ovšem v této oblasti minimální v porovnání s C pásmem. O 10 nanometrů dále je k vidění jak signály šířící se s pumpováním vyšších výkonů mají úměrně svůj

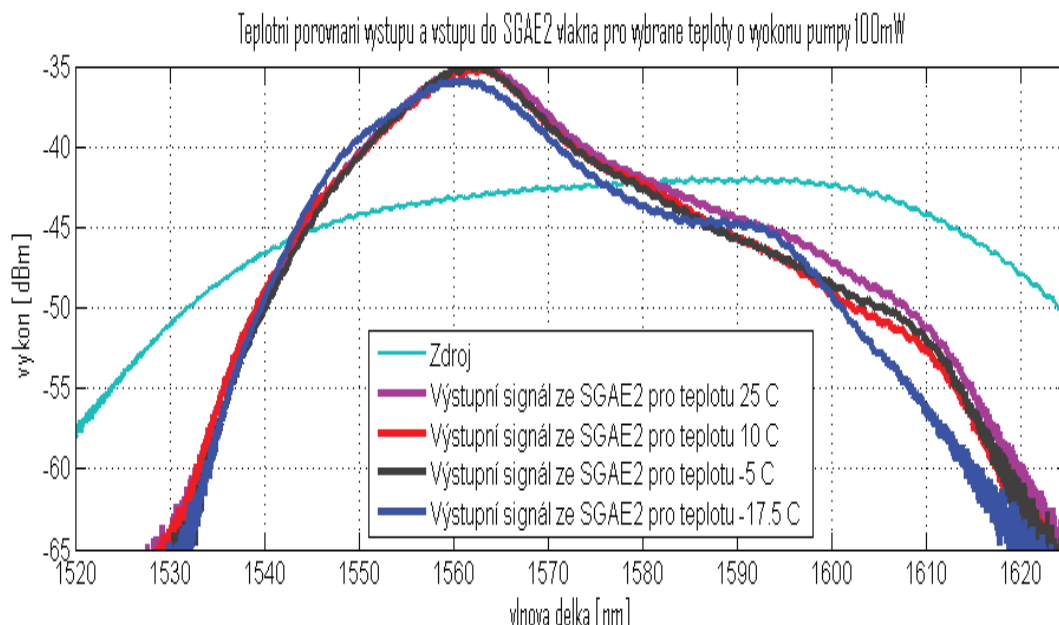
výkonový pokles strmější a tedy v této oblasti nabývají ve spektru nižšího výkonu než signály kde dotace pumpy dosahuje menšího výkonu. Naopak v okolí vlnových délek v oblasti 1520nm lze vidět jak každý z výkonů nevybudil vlákno natolik, aby zde dosahovala zisku.



Obrázek 5.9: Výkonová charakteristika SGAE2 při teplotě 25°C

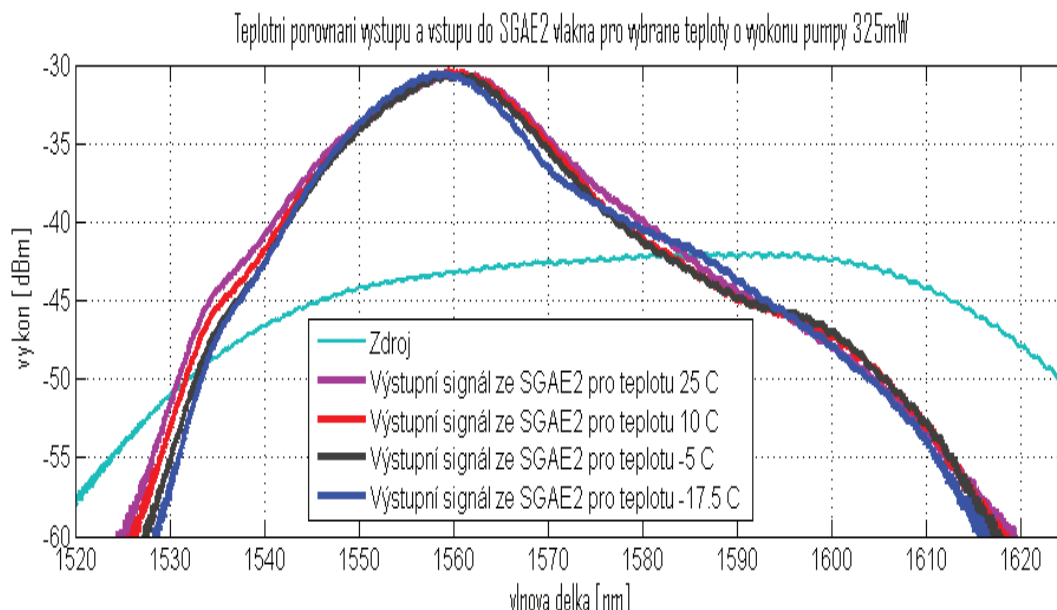
Následující obrázky ukazují jak se chová zesilovač při působení rozdílných teplot na zesilovací vlákna s výkonem signálu pumpy 100mW a 325mW. K dostatečnému znázornění byly vybrány teploty 25, 10, -5 a -17.5 stupňů.

Jako první je k vidění vývoj teploty při pumpování zesilovače výkonem 100mW. Podobně jako ve všech ostatních případech je vidět, že teplota se v C pásmu příliš neprojevila. Pouze stojí za zmínku fakt, že s klesající teplotou má signál tendenci mít v oblasti 1530nm až 1540nm nanometrů nižší hodnotu výkonu oproti teplotám vyšším. Rozdíl ovšem činí desetiny dBm, tedy nejedná se o žádnou markantní hodnotu. Po překonání hranice 1540nm nízká teplota způsobí náhlý a prudký růst výkonu proti nižším teplotám, tento nárůst je v grafu patrný, ovšem opět se nejedná o významný rozdíl. Daní je to, že globální maximum následně dosahuje menší hodnoty výkonu, než jak je tomu v případech vyšších teplot. Stále se nejedná o velký rozdíl. Zisk při vlnové délce 1562nm činí 8dBm. Postupně, po překonání globálního maxima signál opět na výkonu uvažá a pro vyšší teploty nastává plynulý pokles výkonu napříč spektrem. S nižší teplotou ovšem tento pokles plynulý není a naopak po značném poklesu, kdy se již signál stává v porovnání se vstupním signálem slabší je vidět, že na vlnové délce 1594 vzniká opět lokální extrém, který v tomto bodě ovšem nedosahuje většího výkonu než křivka představující 25 stupňů celsia. Následně pak nastává ještě strmější pokles výkonu a v okolí 1609 nanometrů je vidět nejmarkantnější rozdíl způsobený teplotou, tedy 25C v porovnání -17.5 stupňů v této oblasti vykazuje o 5dBm vyšší výkon. Následně výkony všech signálů pozvolna klesají dál ve spektru až dokud nezbude pouze šum. Rozpětí vlnových délek, ve kterém dochází k zesílení vstupního signálu při pumpování výkonu na takové úrovni činí 1544 až 1565. Bavíme se tedy o zisku v rozsahu 20nm spektra. Ve zbytku spektru vlákno už pouze tlumí.



Obrázek 5.10: Teplotní charakteristika výstupu a vstupu do SGAE2 vlákna pro vybrané teploty o výkonu pumpy 100mW

Následuje obrázek zachycující stejné vlákno a stejné teploty, ovšem s výkonem pumpy 325mW. Opět je vidět pro jednotlivé křivky směrem od jejich začátku v C pásmu, že nižší teplota, dosahuje nižších výkonů. Naopak nejvyšší teplota v oblasti 1525nm vykazuje nejvýrazněji vznik lokálního extrému, kdy nižší teploty hranice výkonu -44dBm dosahují až o pár jednotek nanometrů dále. Nejnížší teplota má pak globální maximum opět trochu posunuté přibližně o 1 až 2 nanometry směrem k C pásmu. Zajímavější je opět pohled na pásmo L, po překonání globálního maxima nejnížší teplota znovu způsobuje strmější pokles oproti ostatním teplotám, ovšem pak následuje jeho rychlé vyrovnění a vlákno vykazuje v oblasti 1585 další lokální extrém. Ostatní teploty v této oblasti mají spíše lineární pokles. Odchylky, které způsobuje teplota -17.5 stupňů jsou patrné i pro -5 stupňů, ovšem v menším měřítku. V tomto případě je druhý lokální extrém k vidění na vlnové délce 1600 nanometrů. Dále pak ž je rozdíl mezi teplotami minimální, konstatovat lze pouze to, že nižší teploty v tomto bodě opět vykazují menší úroveň výkonu. Pořád se ale jedná pouze o desetiny maximálně jednotky dBm. Spektrální rozpětí, ve kterém vlákno vykazuje zisk na této úrovni dotace energie z pumpy činí 1554 až 1581, což je pochopitelně více, než je tomu v případě pumpování 100mW. Maximální zisk je v tomto případě přibližně 13dBm oproti vstupnímu signálu. Tedy vstupní signál zdroje s hodnotou na vlnové délce 1600 nanometrů je -43dBm a na výstupu zesilovače -30dBm. Nejmarkantnější rozdíl způsobený teplotními změnami je pro toto vlákno s výkonem pumpy 325mW k vidění na vlnové délce 1535 nanometrů kdy nejnížší a nejvyšší teplota způsobí rozdíl výkonu vlákna přibližně 4dBm. Naopak nejmenší rozdíl, který teplota způsobila v případě takto vybuzeného vlákna je k vidění při vlnové délce 1550nm, kde se jednotlivé křivky téměř překrývají.



Obrázek 5.11: Teplotní charakteristika výstupu a vstupu do SGAE2 vlákna pro vybrané teploty o výkonu pumpy 325mW

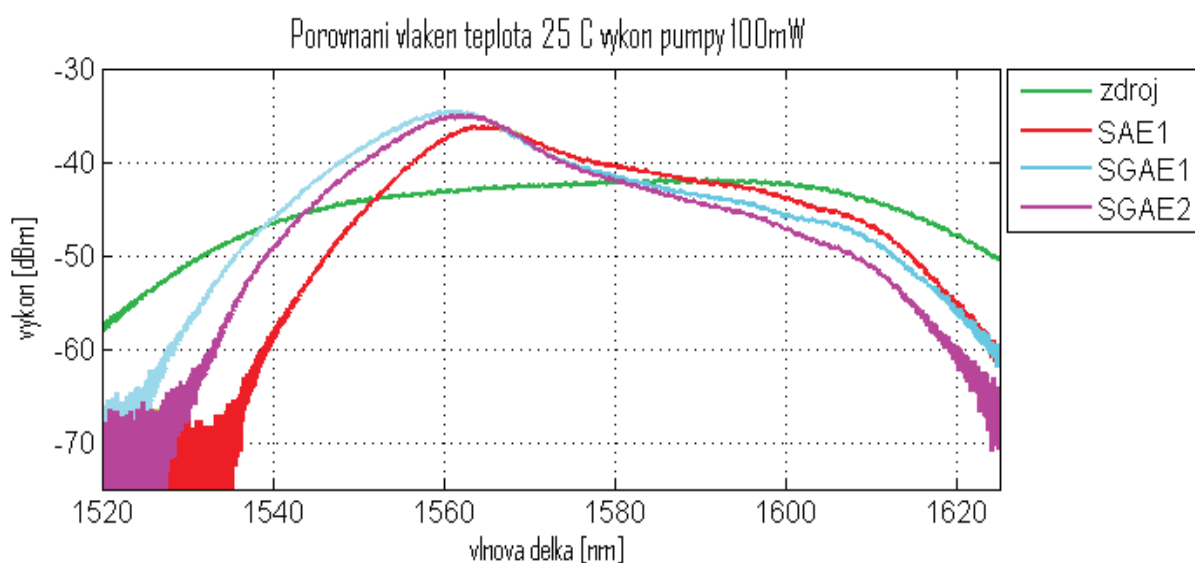
5.1.4 Porovnání vláken mezi sebou

Na předešlých stránkách je popsáno jakým způsobem se chovala jednotlivá vlákna, každé samo za sebe. Následovat bude srovnání vláken samotných při stejné teplotě a stejném výkonu pumpy. K tomuto účelu byly vybrány referenční teploty 25 a -17.5 stupňů. Sledovat vlákna při tom bude zajímavé až od výkonů, kdy jsou dostatečně vybudena k tomu, aby byla křivka jejich spektrální výkonové charakteristiky dobře viditelná. Výkony nižší než je úroveň 75mW pumpy nemají příliš výpovědní charakter, protože výstupní signál je spíše pořád ještě šum. Výkonové úrovně tedy budou 100 a 325mW.

Nejdříve tedy pohled na chování vláken optickém výkonovém spektru pro teplotu 25 stupňů s výkonem 100mW. Jak je patrné, vlákna SGAE dosahují vyššího zesílení než je tomu v případě vlákna SAE, což je způsobeno útlumem samotných vláken a pak také množstvím dopovaného materiálu, tedy erbia nacházejícího se v každém z vláken. Přesto, že se nejedná o nikterak velký rozdíl, tak vlákno SGAE1 dosahuje nejvyšší úrovně výkonu, tedy i nejvyššího zesílení při vlnové délce 1562 nanometrů, zisk činní 9dBm. SAE1 dosahuje nejvyšší hodnoty zesílení v oblasti 1565 nanometrů se ziskem 6dBm. Rozdíl mezi vlákny je nejmarkantnější v pásmu C, který se směrem ke globálnímu maximu plynule snižuje. Tento rozdíl je dán typem materiálů, ze kterých jsou jednotlivá vlákna vyrobena. V C pásmu má nejhorší vyzařovací vlastnosti vlákno SAE1. Lze to vidět například při pohledu na vlnovou délku 1540 nanometrů, kde výkonová úroveň SAE vlákna dosahuje hodnoty -58dBm a hodnota SGAE1 je v této oblasti -46dBm, což je značný rozdíl. Vlákno SGAE2 v této oblasti nedosahuje takových kvalit jako vlákno SGAE1, ale pořád se chová lépe, než vlákno SAE1. V rozpětí vlnových délek 1570, do 1580 se vlákna od sebe liší minimálně. V L pásmo naopak odlišností opět začíná přibývat, i přes to, že se nejedná už o tak velký rozdíl jako tomu je v případě C pásma, je zde několik zajímavých situací. V tomto pásmu naopak začíná dominovat vlákno SAE1, je patrné, že všechna vlákna v okolí 1580-1590nm přestávají vstupní signál zesilovat a naopak jej utlumují, ovšem vlákno SAE1 v tomto případě nejméně. V jeho těsné blízkosti je opět vlákno SGAE1 s rozdílem maximálně 1dBm. Nejhorším vláknem v této oblasti je vlákno SGAE2. V okolí 1610nm lze vidět zlomový bod, kdy se mění strmost

poklesu výkonové úrovně výstupního signálu pro jednotlivá vlákna, od této hranice je sklon vyšší a výkon klesá rychleji.

Při srovnání vláken při pokojové teplotě 25 stupňů a 100mW výkonu dotovaného pumpou je nejlepším vlákno SGAE1. vlákno SGAE2 je dominantnější proti vlákno SAE1 v C pásmu, naopak je tomu ovšem v pásmu L. Důležité je ovšem to, že globální maximum vlákna SGAE2 je vyšší a proto se toto vlákno řadí na druhé místo. Nejhorším vláknem je tedy vlákno SAE1. Toto srovnání je ovšem platné pouze pro vybuzení vláken o poměrně slabém výkonu. Zajímavější bude pohled na vybuzená vlákna výkonem 325mW.

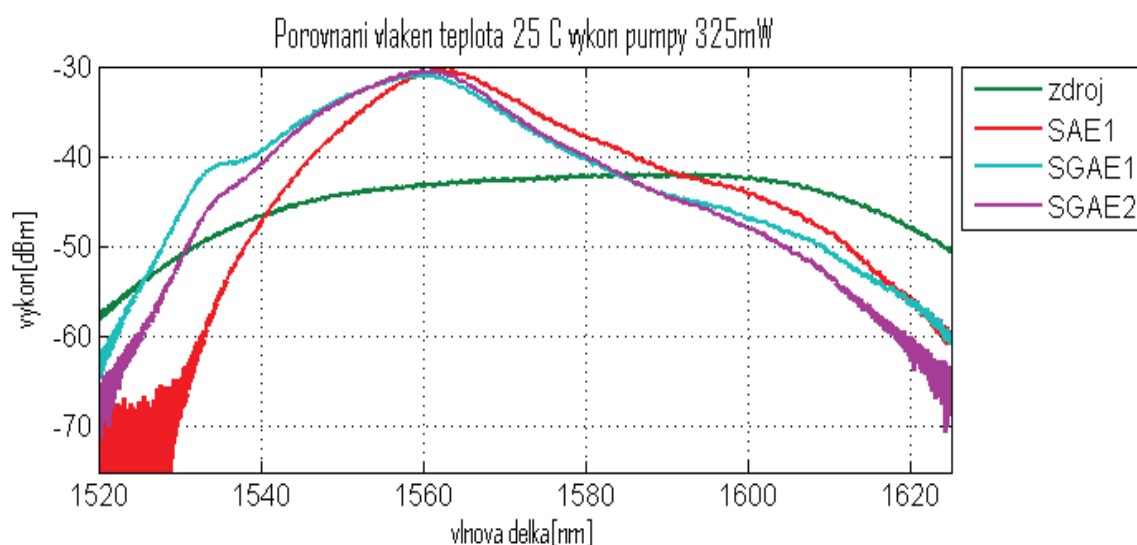


Obrázek 5.12: Srovnání experimentálních vláken pro teplotu 25 stupňů a výkonu pumpy 100mW

Následující obrázek představuje obdobu předešlé situace s rozdílem výkonu, který je dodáván vláknům, tedy 325mW. Na tomto obrázku je vidět, jak jsou všechna vlákna již vybuzená a zesilovač se nachází v bodu nasycení. V tomto případě dosahují všechna vlákna stejného zisku. Čili vlákno SAE1, které v případě buzení 100mW nedosahovalo tak velkého výkonu jako vlákna SGAE nyní dosahuje stejné úrovně. Maximální zisk se ovšem bude stejně lišit, což je způsobeno tím, že širokopásmový optický zdroj nedodává napříč spektrem konstantní úroveň výkonu výstupního signálu. Vlákna SGAE dosahují zisku 13dBm, vlákno SAE 12dBm. Nicméně výkonová úroveň výstupního signálu všech tří experimentálních vláken je -30dBm v oblasti 1560nm. V C pásmu opět dominuje SGAE1, ovšem v porovnání s předešlým grafem zde toto vlákno vykazuje lokální extrém. Podobné chování je k vidění i pro vlákno SGAE2, nicméně jev není tak výrazný. Vlákno SAE1 naopak vykazuje typické chování EDF vlákna v C pásmu, kdy je vidět plynulý růst výkonu až dokud není dosaženo globálního maxima. Při vlnové délce 1535nm je výkonový rozdíl mezi vlákny SAE1 a SGAE1 největší, vlákno SAE1 v tomto bodě má výkon -60dBm, což je signál na samotné hranici čitelnosti pro detekování přijímačem. Vlákno SGAE1 v tomto bodě dosahuje výkonu -42dBm, což je bod, kdy už vlákno vykazuje zisk zhruba 7dBm. Vlákno SGAE2 vykazuje výkon -44dBm, tedy jeho zisk je 5dBm. V pásmu L opět rozdíl už není tak obrovský jak v C pásmu. Zde opět dominuje vlákno SAE1. Vlákna SGAE od globálního maxima 1562nm až do 1595nm mají totožné chování. Vlákno SAE1 v průměru o 2 až 3dBm má lepší výstupní výkon než vlákna SGAE. V okolí vlnové délky 1620

ovšem vlákno SGAE1 překonává vlákno SAE1, nicméně v této oblasti se už vstupní signál utlumuje a to o celých 5dBm.

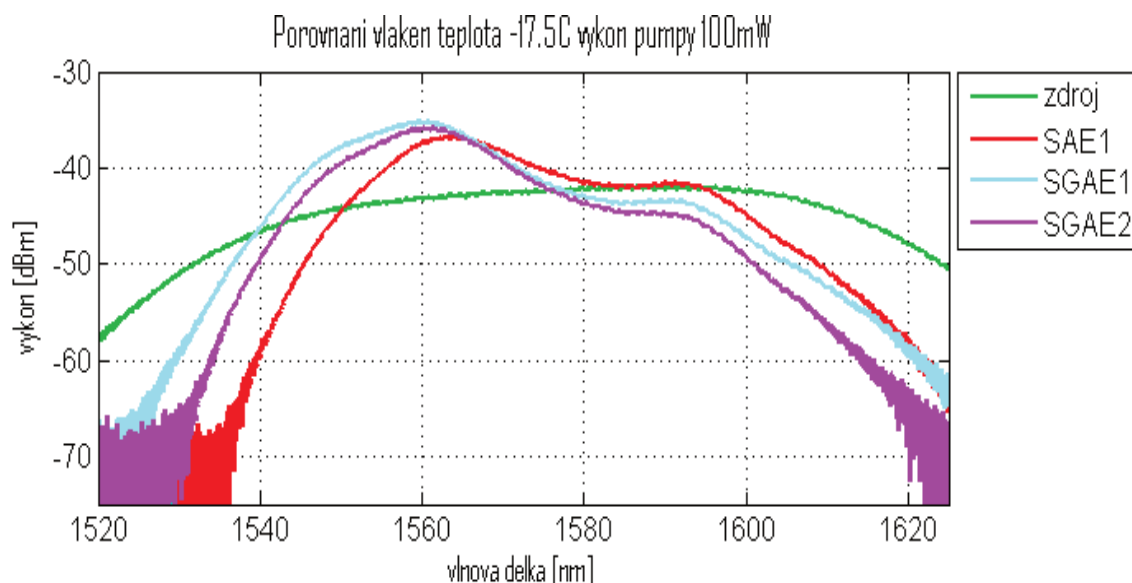
Srovnání vláken při teplotě 25 stupňů jasně ukázalo, že vlákno SGAE1 dosahuje nejlepších kvalit. Druhým vláknem v pořadí je vlákno SGAE2, které je svými parametry podobné vlákno SGAE1, ovšem díky menší míře dotace a rozdílnému typů materiálů použitých pro vytvoření pláště, což vede k rozdílu ve spektrální charakteristice vláken. Nejhorším vláknem je vlákno SAE1, i přes to že má v L pásmu lepší charakteristiku než SGAE vlákna, rozdíl v pásmu C mezi jednotlivými výkonovými úrovněmi je natolik velký, že jej lepší výsledky v L pásmu nedokážou vykompenzovat.



Obrázek 5.13: Srovnání experimentálních vláken pro teplotu 25 stupňů a výkonu pumpy 325mW

Následující obrázky ukazují grafy, které posuzují rozdíl mezi vlákny při použití stejných výkonů, ovšem s nejnižší testovanou teplotou -17.5 stupňů. Jak je patrné z obrázku vlákna se opět nachází ve stavu, kdy ještě nejsou dostatečně vybuzená, nicméně už je k vidění jak se postupně tvaruje jejich typická křivka výkonové charakteristiky ve spektru vlnových délek. Přestože se jedná o velký teplotní skok, chování jednotlivých vláken v porovnání mezi sebou se příliš nemění. SGAE1 představuje opět dominantní chování v C pásmu.. Dále po překonání globálního maxima toto vlákno vykazuje horší chování v porovnání s vláknem SAE1, v okolí vlnové délky 1620 nanometrů se ovšem dostává na jeho úroveň. Od hranice vlnové délky 1580nm dále je nejhorším vláknem SGAE2. V této oblasti je horší než vlákno SAE1 místy až o 3dBm. Všechna vlákna vlivem teploty v oblasti vlnových délek 1595 nanometrů vykazují lokální extrém, přesněji maximum. negativem je to, že i když zde určitý extrém nastává i tak je vstupní signál ze zdroje utlumován., pouze v případě SAE1, to signál nezesiluje ani nezeslabuje. Následně ale postupně k vyšším vlnovým délkám všechny vlákna plynule snižují svůj výkon. Vlákná SGAE při pumpování na této úrovni dosahují většího zesílení, než je tomu v případě vlákna SAE1 a to se získá 7dBm. Vláknem SAE1 vykazuje zisk 5dBm a to jak díky nižšímu zesílení, tak díky tomu, že vstupní signál zdroje je v oblasti vlnové délky 1563nm na vyšší úrovni, než jak je tomu v případě 1561nm. Největší výkonový rozdíl mezi vlákny je vidět opět v okolí vlnové délky 1540 nanometrů mezi SAE1 a SGAE1 vlákny, rozdíl činí 7dBm. V tomto případě je opět

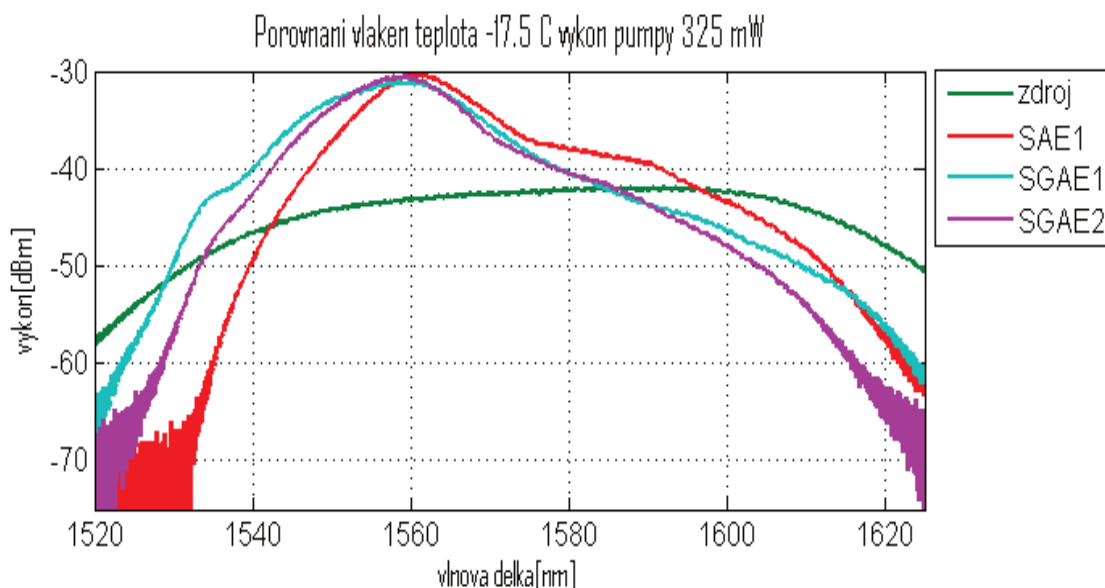
nejlepším vláknem SGAE1, Nejhorším pak SAE1 a mezi nimi vlákno SGAE2, přičemž toto vlákno v konečném důsledku svou kvalitou není daleko od vlákna SAE1, protože lepší chování v C pásmu je nahrazeno nejhorším chováním v L pásmu.



Obrázek 5.14: Srovnání experimentálních vláken pro teplotu -17.5 stupňů a výkonu pumpy 100mW

Následuje pohled při stejné teplotě, ovšem s výkonem pumpy 325mW, kdy jsou všechna vlákna opět dostatečně vybudzená a zesilovač se nachází v bodě nasycení, tedy jeho výstupní výkon dosahuje maximálních hodnot.

Vlákno SGAE1 znovu vykazuje lokální extrém v C pásmu okolí vlnové délky 1533 nanometrů. Toto chování je možné pozorovat i v případě vlákna SGAE2, ovšem nikoliv v takové míře. Zajímavý je pohled na globální maximum. V tomto případě dosahuje nejvyšší hodnoty vlákno SAE1 ačkoliv se zpočátku chovalo hůř než vlákna SGAE, po dostatečném vybudzení je vidět, že výkon v oblasti 1562 nanometrů je nejvyšší. Zisk ovšem podobně jako v předchozích případech činí 13dBm. Mezi vlnovými délkami 1560nm až 1570nm se křivky pro jednotlivá vlákna liší minimálně. Následuje postup dál do L pásmu, zde nejvyšších hodnot výkonů dosahuje znova vlákno SAE1 dokud nedosáhne hranice 1610nm, kdy jej vlákno SGAE1 dorovnává. Nejhorším vláknem v této oblasti je stejně tak jako doposud vlákno SGAE2. Od globálního maxima do dosažení hranice 1590nm je chování vláken SGAE totožné. Rozpětí vlnových délek pro které jednotlivá vlákna vykazují zesílení vstupního signálu je pro vlákno SAE1 1542 až 1598 nanometrů, pro vlákno SGAE1 1530 až 1584 nanometrů a pro SGAE2 1533 až 1585 nanometrů. Lokální maximum, které bylo k vidění při buzení vláken pro výkon 100mW již zmizelo pro vlákna SGAE. Vlákno SAE1 stále určitý náznak vykazuje při vlnové délce 1590nm, nicméně nejedná se o tak zaoblený hezky vytvarovaný trend jako v případě 100mW dopování.



Obrázek 5.15: Srovnání experimentálních vláken pro teplotu -17.5 stupňů a výkonu pumpy 325mW

5.1.5 Shrnutí vlastností experimentálních vláken

Jednotlivá experimentální vlákna byla proměřována a posuzována s ohledem na vstupní výkon zdrojového širokospektrálního záření, výkonu záření dodaného optickou pumpou a teplotou, kterou byla zatěžována.

Nejlepší výsledky byly vypořovány v případě vlákna SGAE1, které je vybuzeno nejrychleji ze všech měřených vláken. Zisk v tomto případě dosahuje maximální hodnoty 13dBm a v oblasti C pásma vlnových délek je výkon ve všech případech vyšší, než pro ostatní vlákna. Při dostatečném vybuzení je pak dále k vidění vznik lokálního extrému v okolí vlnové délky 1535 nanometrů, ovšem s poklesem teploty tento extrém dosahuje menší hodnoty výkonu. V L pásmu vlákno vykazuje podobné vlastnosti jako vlákno SGAE2, ovšem jenom do dosažení hranice 1580 až 1590 nanometrů v závislosti na teplotě, s nižší teplotou je tato hranice blíže k 1580 nanometrům

Druhým vláknem, které v pořadí dosahuje nejlepších výsledků je vlákno SGAE2. Toto vlákno vykazuje podobné chování v C pásmu jako vlákno SGAE1, což je v porovnání s výkonovou charakteristikou běžných EDF vláken rozdílné. Úroveň výkonu je v C pásmu nižší než v případě vlákna SGAE1, což je způsobeno množstvím dopovaného erbia v materiálu vlákna při výrobě. Toto vlákno také při vlnové délce 1530nm vykazuje útlum 12dB za každý metr. Rozdíl mezi tímto vláknem a vláknem SAE1 je patrný hlavně v tom, že toto vlákno vykazuje zisk zejména v pásmu C, naopak v pásmu L dominuje SAE1. L pásmo ovšem díky povaze samotného zesilovače nemůže dosahovat tak velkého zisku, jako C pásmo.

Posledním vláknem je vlákno SAE1. Jelikož má nejvyšší hodnotu útlumu 20dB pro vlnovou délku 1530nm, což v porovnání s dalšími experimentálními vlákny je téměř dvojnásobná hodnota. Z tohoto důvodu je zapotřebí vlákno nejprve vybudit vyšším výkonem pumpy, než ostatní dvě. Zatímco SGAE vlákna již při dotaci 75mW energie pumpy dosahují alespoň minimálního zisku, vlákno SAE1

potřebuje výkon alespoň 100mW. Křivka výkonové charakteristiky je v C pásmu plynule rostoucí a po dostatečném vybuzení toto vlákno dosahuje stejného zisku jako vlákna SGAE s tím rozdílem že globální maximum je posunuto o přibližně 2 nanometry směrem k vyšším vlnovým délkám.

Odlišnosti mezi vlákny navzájem napříč všemi teplotami a výkony zůstává z většiny stejné. Všechna vlákna napříč rozdílným materiálovým vlastnostem dosahují při dostatečném vybuzení stejného výkonu. Vlákna označením SGAE jsou si podobná, je to dáno tím, že se příliš neliší materiálovými vlastnostmi. Tento fakt dokazuje i jev, kdy obě vlákna při dosažení výkonové úrovně 150mW pro SGAE1 a 225mW pro SGAE2.

6 Testování teplotního vlivu na EDFA zesilovač zapojený do CWDM PON sítě

Měření, které bylo provedeno, bylo zaměřené především na testování zesilovače pro signál putující ze širokopásmového zdroje. Je to tedy signál, který je především šumem, protože nenese žádná užitečná data a jedná se jen laserem vybuzená přenosová C a L pásma. Díky tomu bylo možné určit vliv teploty na EDF vlákna a samozřejmě úroveň buzení. Díky tomu, že vstupní signál byl navíc neustále konzistentní, bylo tento vliv možné popsat v jeho maximální možné míře. Důležitým faktem je, že zesilovač nebude pracovat s takovýmto vstupním signálem, ale bude nasazen do optické xWDM sítě, kde bude zesilovat skutečné kanály, tedy světelné signály nesoucí data. Nebude se tedy jednat pouze o nepřerušovaný tok fotonů z laserového zdroje, nýbrž o kódovanou informaci jejíž přenosové médium je světlo. Cílem je zesílit všechny kanály najednou s co nejvyšším ziskem. Úkolem je pak zjistit, jak se bude zesilovač složený z experimentálních EDF vláken.

Aby bylo možné provést takové testování, bylo nutné využít existující xWDM síť. K tomuto účelu posloužila CWDM síť vybudovaná v prostorách školy ke studijním a experimentálním účelům. Nejdříve je tedy nutno vytvořit topologii, následně provést experimentální měření, kdy se zjistí vlastnosti sítě, tak aby bylo možné v závislosti na nich posuzovat vliv EDFA zesilovače, který se do sítě posléze připojí.

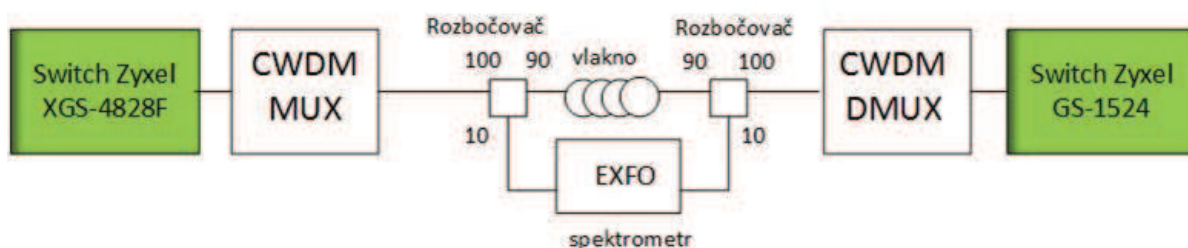
6.1 Popis použitých komponent pro testovací síť

K sestrojení sítě, pomocí které by bylo možné testovat zesilovač EDFA je potřeba zajistit mnoho věcí. Nejdříve je třeba zapojit optickou síťovou jednotku OLT, tedy bod, který představuje přístup dál do páteřní sítě, skrze který přichází vnější komunikace. Dále pak je potřeba zajistit bod koncového účastníka, tedy ONU jednotku. V našem případě tyto prvky budou zajišťovat dva switche, které jsou vybaveny SFP moduly, ty slouží jako rozhraní mezi optickou a metalickou částí sítě. Jedná se o switch ZyXel XGS-4528F L3 s podporou přenosových rychlostí 100/100Mbit/s a 10Mbit/s, který má 20 portů 1000BaseT a 4 Gigabitové duální porty v roli OLT. Bude osazen dvěma SFP moduly. Druhý je switch ZyXel G-1524 s připojenými dalšími dvěma SFP moduly rovněž disponující čtyřmi Gigabitovými duálními porty a představuje ONU jednotku. To jsou tedy dva účastníci komunikující v síti. K realizaci a přesnému sledování EDFA zesilovače by ovšem bylo potřeba mnohem více kanálů a to díky skutečnosti, že se jedná o systém s hrubým multiplexem. Vzhledem k tomu, že k dispozici bylo omezené množství síťových prostředků byly použity pouze 2 SFP moduly.

Tyto dva signály byly spojeny multiplexorem, který je oba pomocí vlnového dělení spojil do jednoho vlákna. Výsledný signál poté projde skrze optickou trasu, která představuje cestu, kterou putuje ke koncovým účastníkům a naopak. Po překlenutí určité vzdálenosti na trase bude signál vlivem parazitních jevů utlumen a jeho výkonová úroveň klesne. Pokud takový signál ztratí tolik výkonu, že se jeho hodnota dostane na hranici -24dBm lze konstatovat, že bude pro přijímač obtížné rozeznat jej od šumu a tím bude signál ztracen. Z tohoto důvodu zde bude umístěný testovaný EDFA zesilovač. Úkolem bude měřit trasu v bodě, kdy se signál nachází před vstupem do zesilovače a pak na jeho výstupu, čímž bude možné zjistit, jak se projevuje jeho chování v závislosti na teplotě v optické síti. K tomuto účelu budou sloužit optické spektrální analyzátory od firmy EXFO, podobně jako v předcházejícím měření.

6.2 Měření optické sítě CWDM

Následující obrázek ukazuje topologii optické sítě, která byla využita k experimentálnímu měření, jež bylo nutné provést k získání potřebných naměrů tras a výkonů signálů jdoucích ve směru downstream, tedy ze sítě k uživatelům. Následně pak pro upstream, tedy měření sítě ve směru od účastníků do páteře. Jelikož nelze spektrometr připojit sériově do sítě bez toho, aniž by nedošlo k jejímu přerušení a tím i přerušení komunikace kterou je potřeba testovat, musí být připojen paralelně. Takové zapojení ovšem nejde realizovat bez určitého dělení výkonu, z tohoto důvodu bude potřeba naměřené hodnoty přepočítat. Dalším důvodem proč je signál měřen paralelně je fakt, že optické zdroje používané při experimentálním měření optických komunikací mívají často veliký výkon, což by mohlo poškodit přijímač spektrálního analyzátoru. Vše se provede připojením pomocí dvou optických děličů s dělicím poměrem 90/10. Devadesáti procentní výstup obou slouží k propojení trasy s vláknem a desetiprocentní míří k měřiči. Takto je možné sledovat vliv délky trasy na výkonové úrovně signálů jdoucích upstream a downstream. Skutečný výkon je potřeba následně dle poměru přepočítat na původní hodnotu.



Obrázek 6.1: Schéma zapojení pro testování sítě CWDM

Jak již bylo popsáno v prvním měření, nutnost je zvolit vlnové délky jednotlivých kanálů tak, aby se nacházeli v části spektra, kde zesilovač dokáže zesílit jejich výkon. Jedná se tedy o volbu zdroje záření. V tomto případě se jedná o SFP moduly připojené do switchů.

SFP modul představuje Ethernetové řešení pro optické sítě. GBIC modul, tedy Gigabit Ethernet konvertoru. Představuje zásuvný prvek do switchu, který bude propojen se zařízením pomocí slotu k tomu určenému. Jelikož s vývojem optických sítí byl požadavek, aby switche obsahovali co nejvíce prvků schopných vysílat Ethernetový signál v optickém spektru bylo potřeba GBIC jednotku zmenšit, SFP (Small-Form-Pluggable) představuje tedy zmenšenou verzi GBIC CWDM modulu. V následující tabulce jsou uvedeny parametry SFP modulů, které byly využity pro experimentální měření.

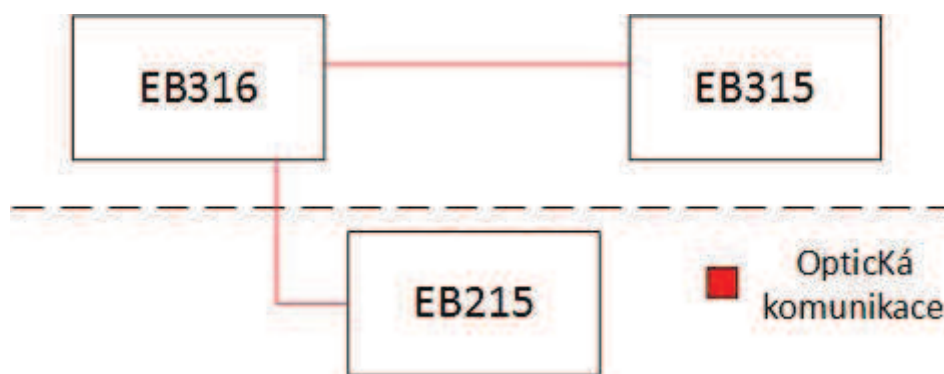
Tabulka 1.11: Parametry SFP modulů 1000Base-ZX

Výrobce	XtendLan	XtendLan	XtendLan	XtendLan
Typ	MGB-L80C55	MGB-L80C57	MGB-L80C59	MGB-L80C61
Výkon vysílače [dBm]	4	4	4	4
Spektrální šířka vysílače [nm]	1	1	1	1
Citlivost přijímače [dBm]	-24	-24	-24	-24
Pracovní vlnová délka [nm]	1100-1600	1100-1600	1100-1600	1100-1600
Garantovaný dosah [km]	80	80	80	80
Vlnová délka	1550	1570	1590	1610

SFP moduly ovšem pracují v určité výkonové toleranci. Pro vzdálenost trasy do 80km se tato výkonová tolerance výstupního signálu pohybuje v rozmezí od 0 do 5dBm. Díky tomu lze očekávat, že výstupní signál v síti může kolísat.

Do každého SFP modulu jsou připojeny dvě optická vlákna, jedno vlákno slouží pro vysílání, tímto vláknem je vysíláno záření o vlnové délce jež je uvedena v tabulce. Druhé vlákno slouží k připojení přijímací části SFP modulu, která je širokospektrální a dovede detekovat záření s rozpětím vlnových délek. Switch představující OLT, tedy downstream měl v sobě připojené SFP moduly s vlnovými délkami 1550 a 1610 nanometrů. Switch který představuje ONU jednotku, bude osazen SFP moduly emitujícími světelné záření na vlnových délkách 1570 a 1590 nanometrů. Tento směr je upstream komunikací.

Na následujícím obrázku je znázorněná infrastruktura optické sítě uvnitř prostor Vysoké školy Báňské technické univerzity v Ostravě. Jednotlivé laboratoře jsou propojeny tak, jak je znázorněno na obrázku. Učebna EB316 představuje downstream, tedy směr komunikace od sítě k uživatelům. Učebna EB215 je pak naopak upstream, směr komunikace od uživatelů do sítě. Na učebně EB315 se nachází propojovací (patch) panel s optickými trasami. Vše tedy funguje tak, že downstream signál jdoucí z EB316 je propojen pomocí optického kabelu s učebnou EB215. Zde jsou oba kanály tvořené SFP moduly připojeny do multiplexoru, jehož výstup je propojen zpět na učebnu EB316. Dále je signál přiveden na učebnu EB315, kde se propojí s optickou trasou. Výstup z optické trasy vede zpátky na učebnu EB316, a pak následně na učebnu EB215, kde je umístěn demultiplexor, který opět rozdělí komunikaci pro jednotlivé účastníky přijímající signál. Stejným způsobem účastníci komunikují zpět ve směru upstream.



Obrázek 6.2: *Infrastruktura optické sítě školy*

Měření započalo zjišťováním, jak se chová samotná síť bez připojené optické trasy. Tím bylo zjištěno jaký vliv mají optické spojky použité v topologii, dále bylo možné se podívat na spektrální charakteristiku a zjistit jak vypadá úroveň signálů upstream a downstream v blízkosti zdroje bez vlivů EDFA zesilovače, či optické trasy, skrze kterou signál bude následně procházet.

Pokud uvážíme, že SFP moduly vyzařují výstupní výkon o hodnotě 4dBm, počet dostupných portů a SFP modulů, zvolili jsme moduly s vlnovou délkou 1550 a 1610 nanometrů jako downstream a 1570 a 1690 jako Upstream. Následoval test časové stálosti výkonů signálů v optické síti. Následující tabulka ukazuje změřené hodnoty upstream a downstream výkonu v jednotkách decibelů na miliwatt pro signály sítě, vysílané v čase s krokem tří minut po dobu třičtvrtě hodiny. Díky tomu, že signál

jdoucí do spektrálního analyzátoru má hodnotu pouze 10 procent výkonu původního signálu, je potřeba změřený výkon dále přivést na reálné hodnoty. V levé části tabulky je tedy vidět výkon, který byl změřen spektrálním analyzátozem a vpravo pak naopak přepočítaný výkon, který by měl odpovídat reálné hodnotě. Vzhledem k množství spojů a svárů je výkon, který byl naměřen downstream odpovídající tomu, co je možné získat z SFP. Naneštěstí v případě Upstreamu tomu tak není. Signál s vlnovou délkou 1570nm je konzistentní a odpovídá očekávané hodnotě, to ovšem až dokud neuplynulo 39 minut od zahájení měření, kdy byl zaznamenán prudký pokles výkonu o 10dBm. Vlnová délka 1550 nanometrů signálu vykazuje hodnotu téměř o 10dBm nižší než ostatní kanály a ve stejnou dobu jako vlnová délka 1570nm poklesne také o 10dBm. Postupně byly měřeny všechny části sítě a nebyl zjištěn žádný bod, kde by byl vysoký vložný útlum.

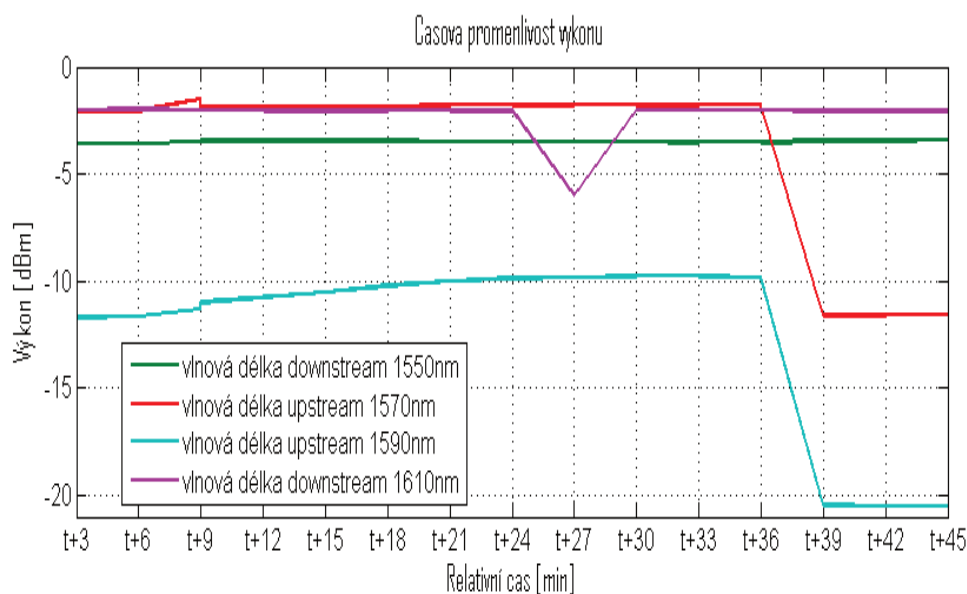
Po zvážení bylo dosaženo závěru, že se jedná buď o omezování provozu protokolem SpanningTree, který na úrovni spojové vrstvy ISO modelu zabráňuje vzniku smyček a tím zahlcováním sítě cyklicky opakujícím se provozu sítě. Druhou možností je vliv multiplexorů samotných. I přes to že nebyla zjištěna významná hodnota vložného útlumu na žádném z nich, testování bylo provedeno pomocí jednoho měření. V tomto případě by bylo dobré podrobit multiplexory detailnějšímu testování.

Tabulka 1.12: *Měření časové proměnlivosti výkonů v síti*

Relativní čas [min]	1550	1570	1590	1610	1550	1570	1590	1610
t+3	-13.6	-15.09	-24.69	-15.03	-3.6	-2.09	-11.69	-2.03
t+6	-13.59	-15.07	-24.65	-14.98	-3.59	-2.07	-11.65	-1.98
t+9	-13.49	-14.49	-24.29	-15.03	-3.49	-1.49	-11.29	-2.03
t+12	-13.47	-14.89	-23.98	-15.06	-3.47	-1.89	-10.98	-2.06
t+15	-13.46	-14.84	-23.51	-15.07	-3.46	-1.84	-10.51	-2.07
t+18	-13.47	-14.83	-23.21	-15.06	-3.47	-1.83	-10.21	-2.06
t+21	-13.49	-14.82	-23.01	-15.06	-3.49	-1.82	-10.01	-2.06
t+24	-13.5	-14.82	-22.87	-15.05	-3.5	-1.82	-9.87	-2.05
t+27	-13.49	-14.81	-22.81	-15.05	-3.49	-1.81	-9.81	-6
t+30	-13.51	-14.81	-22.8	-15.03	-3.51	-1.81	-9.8	-2.03
t+33	-13.52	-14.82	-22.8	-15.02	-3.52	-1.82	-9.8	-2.02
t+36	-13.52	-14.82	-22.82	-15.02	-3.52	-1.82	-9.82	-2.02
t+39	-13.45	-24.61	-33.47	-15.07	-3.45	-11.61	-20.47	-2.07
t+42	-13.43	-24.6	-33.5	-15.08	-3.43	-11.6	-20.5	-2.08
t+45	-13.42	-24.6	-33.49	-15.07	-3.42	-11.6	-20.49	-2.07
Průměr	-13.49	-16.79	-25.46	-15.31	-3.49	-3.79	-12.46	-2.31
SM odchylka	0.051	4.044	4.207	1.022	0.051	4.044	4.207	1.022
Rozptyl	0.00	16.35	17.70	1.04	0.00	16.35	17.70	1.04

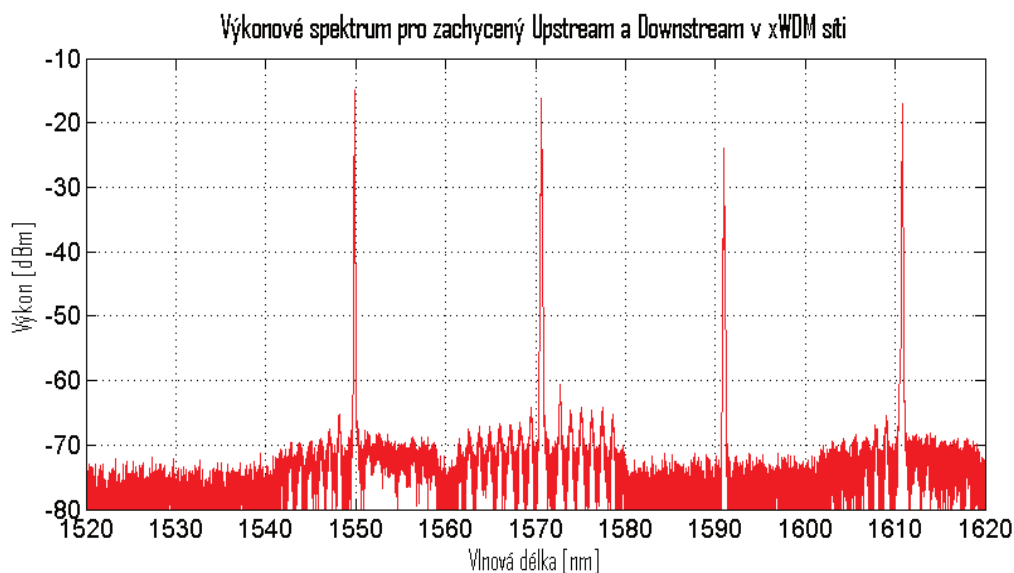
SFP moduly byly takto připojené do switchů po celých 24 hodin. Následně se provedlo dodatečné očištění konektorů a skoky výkonu, jako je vidět v 39 minutě měření ustály a kanály byly

konzistentní. Následující obrázek znázorňuje graficky naměřené hodnoty sepsané v tabulce v jejich 100 procentní hodnotě.



Obrázek 6.3: Časová proměnlivost výkonu CWDM sítě

Následující obrázek zachycuje pohled na výkonové spektrum se signály o jednotlivých vlnových délkách na kterých svítí SFP moduly. Spektrum je změřeno spektrálním analyzátozem podle schéma zapojení na obrázku (6.1).



Obrázek 6.4: Výkonové spektrum sítě s nasazenými kanály pro Up a Downstream

6.2.1 Měření útlumu optických tras

Podle schéma měření na obrázku (6.1) se bude nacházet optická trasa mezi multiplexory, k tomuto účelu byly využity připravené optické vlákna na učebně EB315, jejichž vývody jsou přivedeny do dvou propojovacích panelů. První panel obsahuje připojené trasy o délce 10km a druhý o délce

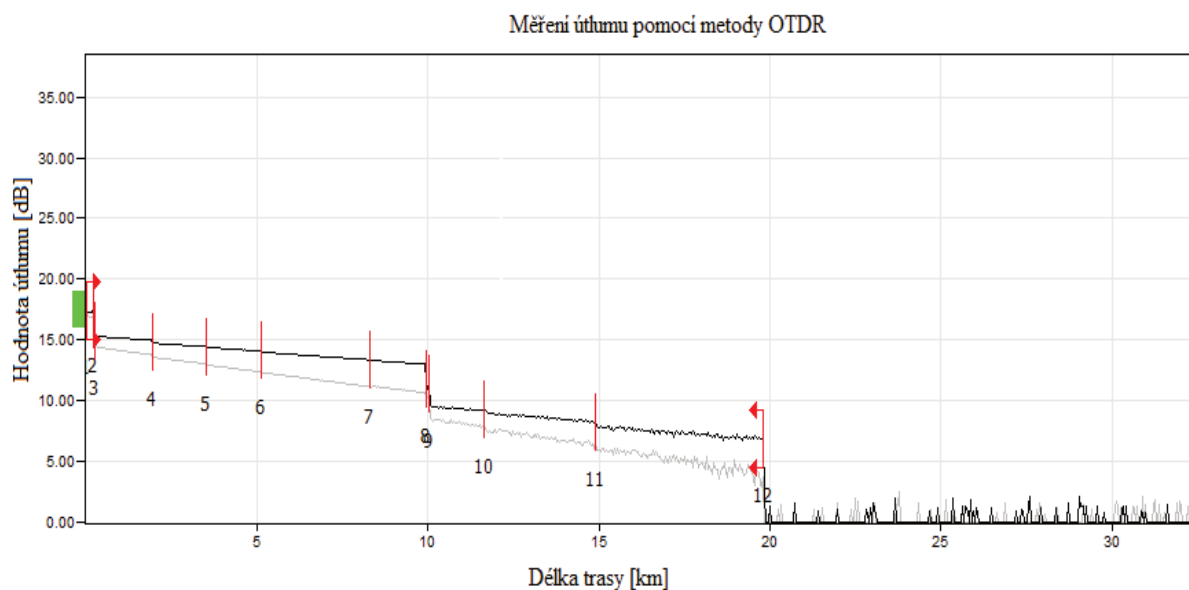
5km. Jednotlivé trasy je možné mezi sebou navzájem propojovat a tím zvyšovat délku podle uvážení. Pro experimentální měření je potřeba nejprve zjistit, jaké útlumy trasy mají.

K tomuto účelu byl vyžit měřicí přístroj fungující na principu OTDR (EXFO 7200D) neboli odrazu zpětného signálu vyslaného ze zdroje vlivem nelineárních rozptylů. Využití zařízení je schopné měřit útlum jak v případě jednovidových tak i pro vícevidová vlákna. Činnost tohoto zařízení je podobná principu DTS s tím rozdílem, že velikost první mrtvé zóny je kratší než jeden metr. Následující tabulka obsahuje souhrnné hodnoty útlumu měřené na jednotlivých trasách, které budou využity v rámci experimentálního měření. Z původních pěti a deseti kilometrových tras byly pomocí sériové kombinace poskládány trasy v rozmezí od 0 až do 40km.

Tabulka 1.13: *Tabulka útlumů naměřených metodou OTDR pro jednotlivé trasy*

Trasa	Délka [km]	Útlum [dB]	Měrný útlum [dB/km]
5km	5.125	2.4705	0.48205
10km	10.016	3.6215	0.36157
15km	14.7809	7.0865	0.47944
20km	19.586	9.622	0.49127
25km	24.711	12.0925	0.48936
30km	29.602	13.2435	0.44739
35km	34.3669	16.7085	0.48618
40km	39.4919	19.179	0.48564

Obrázek níže představuje jedno z měření provedené metodou OTDR, konkrétně se jedná o trasu 20km. V grafu jsou vyznačeny body, ve kterých došlo k nárůstu útlumu. tyto body představují optické spojky a konektory, dále pak také optické sváry. Posledním vyznačeným bodem je konec trasy samotné, za kterou už je vidět pouze šum. naopak prvním bodem je spojka, která spojuje předřadné vlákno s měřeným. Předřadné vlákno kompenzuje mrtvou zónu, což je oblast ve které není možno získat jakékoliv náměry.



Obrázek 6.5: *Příklad grafu měření útlumu trasy pomocí OTDR*

6.2.2 Měření chromatické disperze optických tras

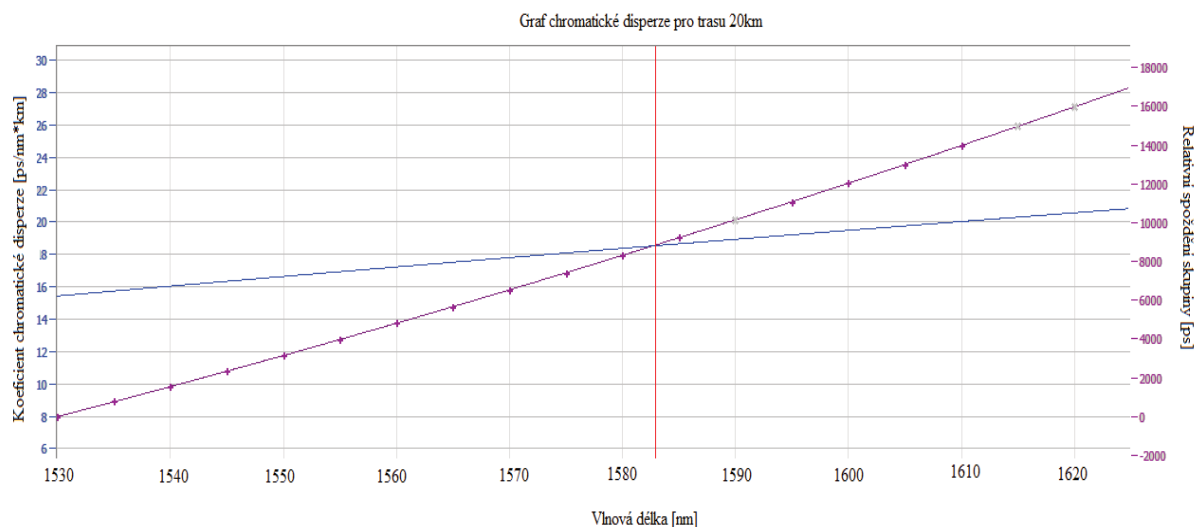
Pro každou z měřených tras je samozřejmě důležité znát jakou má hodnotu útlumu. Důležité je ovšem také vědět jak se projevuje vliv disperze. Jednotlivé trasy byly tedy dále proměřeny za účelem zjištění hodnoty chromatické disperze. Jedná se o jev, který se skládá z tří druhů disperzí, materiálová vlnovodná a profilová. Hodnota jejich součtu představuje hodnotu chromatické disperze. Tento jev je způsobený materiálovými vlastnostmi samotných vláken, ze kterých jsou vyrobené. Chromatická disperze způsobuje rozpad světelného signálu na barevné spektrum, což je představováno množstvím vzniklých pod signálů, z nichž každý má rozdílnou vlnovou délku. Jinými slovy signály s rozdílnou vlnovou délkou urazí v jádře optického vlákna rozdílnou vzdálenost. Díky tomu, že všechny putují skrze vlákno stejnou rychlostí každý překlene trasu v rozdílné době. V důsledku toho dojde k roztažení samotného signálu v čase a to je nechtěný parazitní jev. V praxi se dá tato disperze eliminovat například použitím Braggovské mřížky, kterou si lze představit jako optické vlákno, v jehož jádře je v určitých úsecích pomocí UV záření vyvolána změna indexu lomu. Změna indexu lomu pro určité vlnové délky působí jako odrazné plochy a způsobí jejich odraz. Vše pak funguje tak, že signály jdoucí skrze Braggovskou mřížku jsou postupně odráženy, ty které prostupují nejrychleji skrze mřížku urazí nejdelší vzdálenost. Postupně se všechny paprsky odrazí a putují zpátky na výstup Braggovské mřížky a pak dále po trase. Tím se docílí opoždění rychlejších paprsků a ke kompenzaci účinku chromatické disperze.

V následující tabulce jsou sepsány hodnoty chromatické disperze pro jednotlivé trasy. Už na první pohled je patrné, že vliv disperze je pro jednotlivé trasy podobný, z čehož lze usuzovat, že vlákna jsou vyrobená ze stejných materiálů, protože se jedná o běžná konvenční optická jednovláková vlákna. Hodnoty uvedené v tabulce jsou vztaženy k referenční hodnotě vzdálenosti jednoho kilometru. Pro určení celkové hodnoty za danou trasu je pak následně nutné přepočítat velikost pro celou trasu.

Tabulka 1.14: *Hodnoty chromatické disperze pro jednotlivé trasy*

Trasa	Disperze [ps/nm*km]			
	1550	1570	1590	1610
5km	16.625	17.796	18.941	20.035
10km	16.633	17.812	18.937	20.039
15km	16.389	17.569	18.695	19.797
20km	16.654	17.829	18.951	20.048
25km	16.648	17.819	18.938	20.032
30km	16.658	17.821	18.93	20.016
35km	16.05	17.199	18.295	19.367
40km	16.632	17.405	18.321	19.673

Následující obrázek ukazuje příklad grafu, znázorňujícího křivku chromatické disperze v závislosti na vlnové délce. Modrá křivka představuje trend hodnoty koeficientu chromatické disperze. Pokud je tato hodnota kladná, což lze vidět na stupnici vlevo, znamená to, že delší vlnové délky se zpožďují proti kratším. Kdyby byla tato hodnota záporná, znamená to opak. Fialová křivka představuje trend relativního zpoždění skupiny signálů, které vzniklo vlivem chromatické disperze. Svislá červená křivka představuje kurzor (marker), který se nachází v bodě, kde se hodnota chromatické disperze rovná hodnotě zpoždění skupiny.



Obrázek 6.6: Graf chromatické disperze pro trasu 20km

6.2.3 Měření polarizační vidové disperze

Dalším typem disperze, který byl měřen na jednotlivých trasách je disperze s označením PMD, neboli polarizační vidová disperze. Tento jev vyplývá ze samotné podstaty světla. Prvním způsobem, jak se dívat na světlo je pomocí kvantové fyziky. Světlo je vnímáno jako proud částic, které jsou představovány fotony. Modernějším způsobem vyjádření světla je, že se jedná o elektromagnetické vlnění, tedy vlnění dvou na sebe kolmých složek, elektrické a magnetické. Vlivem přenosu signálu skrze asymetrický tvar jádra optického vlákna dochází k tomu, že jedna s těchto dvou složek, polarizačních rovin, se přenáší skrze vlákno rychleji a druhá pomaleji. Výsledkem je jako v případě chromatické disperze roztažení signálového pulzu v čase. Následující tabulka obsahuje hodnoty PMD změřené pro jednotlivé trasy.

Tabulka 1.15: Hodnoty PMD koeficientu a zpoždění

Trasa	Velikost zpoždění [ps]	Koeficient PMD [ps/km ^{1/2}]
5km	2.994	0.503
10km	0.41	0.182
15km	1.346	0.429
20km	0.598	0.155
25km	2.786	0.063
30km	2.703	0.545
35km	3.339	0.616
40km	2.802	0.447

Pokud se srovná hodnota PMD a CD je patrné, že PMD má mnohem menší vliv na signál a způsobuje mnohem menší zpoždění signálu. Důležité je ovšem to, že chromatickou disperzi je možné kompenzovat snadněji například již zmíněnou Braggovskou mřížkou. V případě PMD je situace obtížnější v tom, že je způsobena jednak samotnou podstatou světla a jednak optickým vláknem. Způsobů kompenzace je několik, častou variantou je přidání speciálního zařízení před přijímač, které

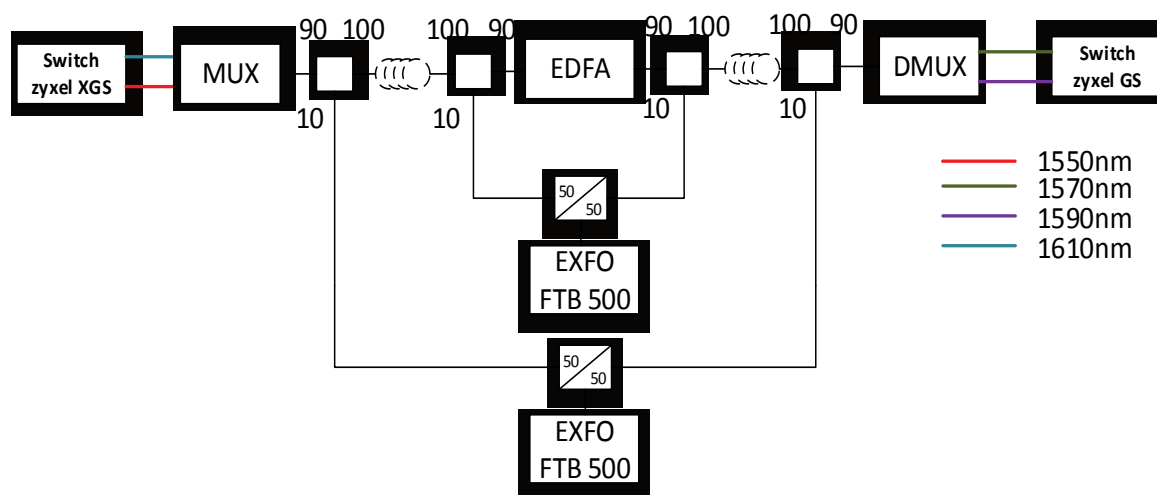
provádí kompenzaci na základě předem změřené hodnoty PMD pro danou trasu. K tomu je ovšem nutné zařízení úměrně hodnotě disperze kalibrovat.

6.3 Testování EDFA zesilovače v síti CWDM

Výše naměřené parazitní jevy, které jsou vykazovány jednotlivými trasami zapojenými do sítě by měly být pro její správnou funkčnost kompenzovány. Cílem experimentálního měření je testovat EDFA zesilovač, který bude zesilovat utlumený signál vystupující z optické trasy opět při variaci teplot od 25 až do -17.5 stupňů.

Následující obrázek zachycuje Schéma měření. Signál jdoucí z leva do pravého směru je downstream a je připojen z laboratoře EB316 do EB215, kde se nachází multiplexor. Výstupem je signál, jdoucí skrze několik kilometrů dlouhé vlákno, které se nachází v laboratoři EB215. Špulka s optickým vláknem představující trasu se nachází hned za prvním optickým děličem 90/10. Pak projde signál dalším děličem a do EDFA zesilovače. Výstupní signál jde posléze skrze další dva děliče na demultiplexor. Výstupem budou opět oddělené signály náležící každý jednomu SFP modulu. Ty následně vysílají světelné signály s vlnovou délkou 1570 a 1590 nanometrů ve směru upstream zprava do leva. V tomto případě bude optické vlákno trasy umístěno doprava za první optický dělič. V jednom okamžiku se bude tedy trasa v případě měření upstream nacházet napravo a v případě downstream nalevo.

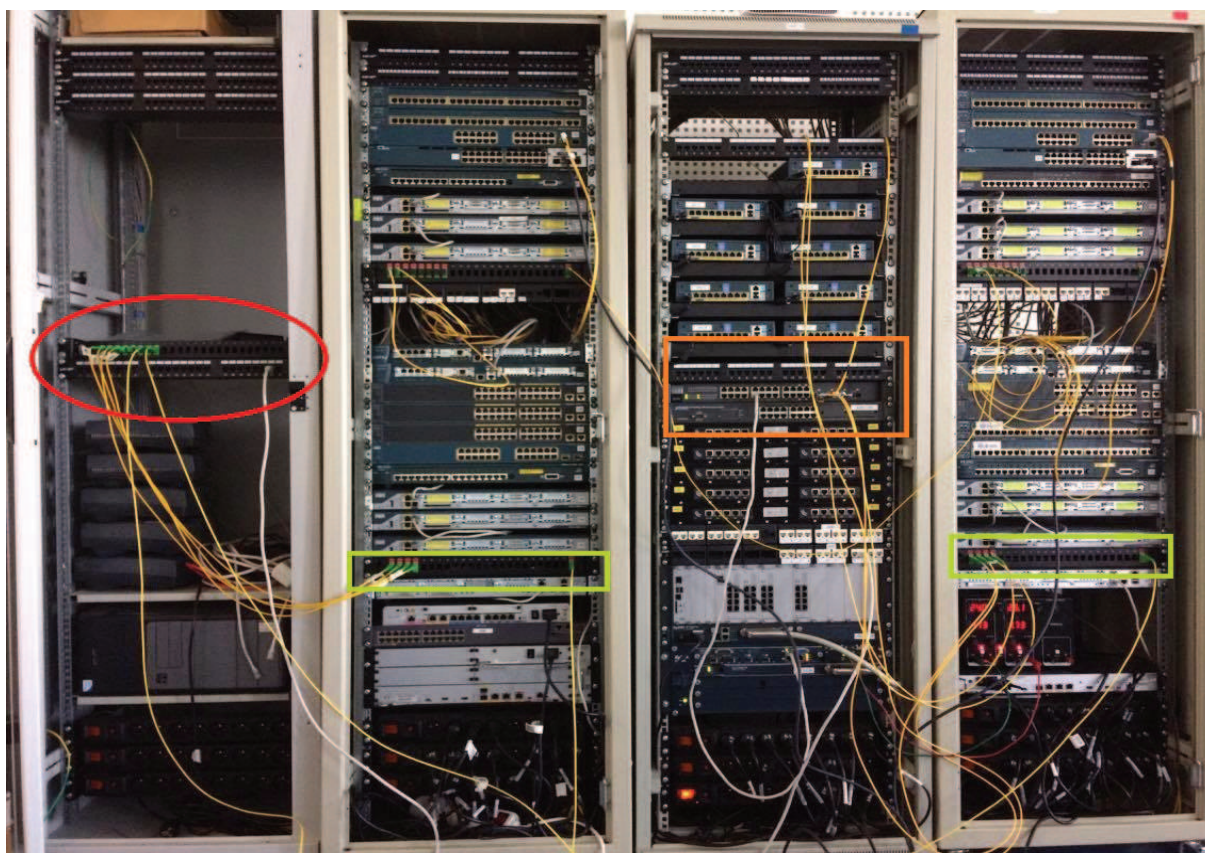
Komunikace probíhá přesně podle sestavené topologie, dalším bodem je připojení samotných spektrometrů kvůli snímání výkonového spektra. Jak je vidět v zapojení jsou využity celkem čtyři optické děliče s poměrem 90/10 a dva 50/50. Pokud je tedy měřen downstream tak na vnějším EXFO analyzátoru bude možné pozorovat signál až těsně před demultiplexorem, to je bod kdy je provedeno zesílení EDFA zesilovačem. Vnitřní EXFO analyzátor pak bude zobrazovat výkon, který se nachází za optickou trasou, tedy dělič nalevo od EDFA. Ve směru upstream je situace opačná. Každý desetiprocentní výstup z jednotlivých optických děličů je spojeny se slučovačem (couplerem), který představuje děliče 50/50. Toto dělení umožní spektrálnímu analyzátoru osazenému pouze jedním vstupním portem ve stejný okamžik vidět oba výstupy optického děliče 90/10.



Obrázek 6.7: Schéma experimentálního měření na CWDM síti

Takto navržené schéma měření, bude vhodné především i z toho důvodu, že uvažíme li proměnlivost výkonů signálu v síti, toleranci výkonů SFP a navíc fakt, že trasy jsou neustále přepojovány i přes to, že se dodržovala maximální možná kontrola čistoty vláken v průběhu měření, tak dochází k drobným odchylkám hodnoty výkonu na vstupu zesilovače. Díky takto navrženému zapojení, je možné měřit v jeden okamžik výstupní výkon z trasy, potažmo vstup do zesilovače a výstup ze zesilovače. Lze tím lépe určit chování, které způsobuje vliv změny teploty. Oba dva analyzátoři ovšem neměří výkon v jeho sto procentní podobě, ale na značně nižší hodnotě. Je proto třeba daný výkon přepočítat na reálnou hodnotu. Pro děliče s dělicím poměrem 90/10 stačí k naměřenému výkonu přičíst 10dBm, čímž se dorovná příslušná hodnota výkonu. Tento desetiprocentní signál ovšem projde ještě skrze další dělič s poměrem 50/50, díky tomu je potřeba 50% výkon dorovnat což se provádí přičtením 3dBm. Ke každému naměřenému výkonu je tedy potřeba přičíst hodnotu 13dBm. Tento přepočet pro všechny prezentované výsledky bude proveden implicitně.

Následující obrázek ukazuje rackové skříně nacházející se na učebně EB215 kde se je umístěn upstream switch, který je zvýrazněný v oranžovém obdélníku. V něm jsou vsunuty SFP moduly připojené do optické sítě pomocí multiplexorů, které jsou zvýrazněny žlutou barvou. Výstup multiplexoru je v jejích pravé části jedná se o bod, kde je přenášén multiplexovaný signál. Výstupy obou jsou pak připojeny do propojovacích panelů v červeném kruhu, které je spojí s učebnou EB316. Dále vedou signály na optické trasy obdobným propojením ovšem na učebnu EB315, kde se nachází i měřicí pracoviště EDF vláken, jež bylo testováno v předešlé kapitole, obrázek 5.1 (Obr. 5.1). Na vstupu je ovšem připojený signál CWDM namísto širokospektrálního zdroje. Výstup je pak propojen se zbytkem sítě místo přímého spojení se spektrálním analyzátořem.



Obrázek 6.8: Rackové zapojení v laboratoři EB215

Měření probíhalo v několika krocích, které se vždy opakovaly. Cílem bylo změřit chování EDFA zesilovače v síti pro celkem 10 druhů teplot od 25 stupňů Celsia až po -17.5 stupňů. Pro každou z teplot byly testovány postupně všechny vlákna. Nejdříve se změřil výkon na výstupu trasy, což by mělo odpovídat přibližně výkonu, který byl změřen v tabulce 1.12 (Tab. 1.12). K této hodnotě se přičítala hodnota útlumu trasy. Následně pak byl měřen výstup ze zesilovače, který ukazuje jak moc se výstupní signál liší od vstupního. Toto měření bylo provedeno pro 3 výkony optické pumpy. Jelikož dokud nejsou všechna vlákna dostatečně vybudovaná tlumí signál a nebylo by možné naměřit validní výsledky. Vezmeme-li v úvahu že citlivost SFP přijímače je -24dBm, signál by nemohl být detektorem rozpoznán. Díky tomu byl první výkon stanovený na hodnotu 100mW, podle prvního experimentálního měření by se při tomto výkonu měla vlákna vybudovat natolik, že se začne tvarovat jejich zesilovací křivka a očekává se že pro zejména vlnovou délku 1570nm bude dosahovat zisku. Naopak kanály 1550nm a 1610nm by měly být utlumeny. Následně Druhý výkon pumpy byl stanoven na 200mW. Vlákna již budou dostatečně vybudovaná a mělo by jít krásně vidět, které kanály zesílí nejvíce a které nejméně, nebo které naopak ještě utlumí. Posledním výkonem je výkon 300mW. Při takové úrovni dotace energie z pumpy by měl být EDFA zesilovač v bodě nasycení a měl by dosahovat svého maximálního zesílení. Dalším krokem je vyměnit trasu a provést měření znovu. Jelikož se s teplotou mění tvar spektrální výkonové charakteristiky pro EDF vlákna, teoreticky by měly výkonové úrovně signálu pro konkrétní hodnotu výkonu pumpy lišit. Tento jev samozřejmě nastane, důležité je ovšem zmínit to, že samotný vstupní signál jdoucí v síti kolísá, protože SFP moduly pracují s určitou tolerancí výkonu, která se pohybuje v rozpětí od 0-5dBm.

Kromě monitorování spektra v průběhu měření bylo potřebné kontrolovat i DTS systém, jehož úkolem je monitorovat teplotu uvnitř měděné kostky kde se nachází experimentální erbiem dopovaná optická zesilovací vlákna.

6.3.1 Testování experimentálního vlákna SAE-1

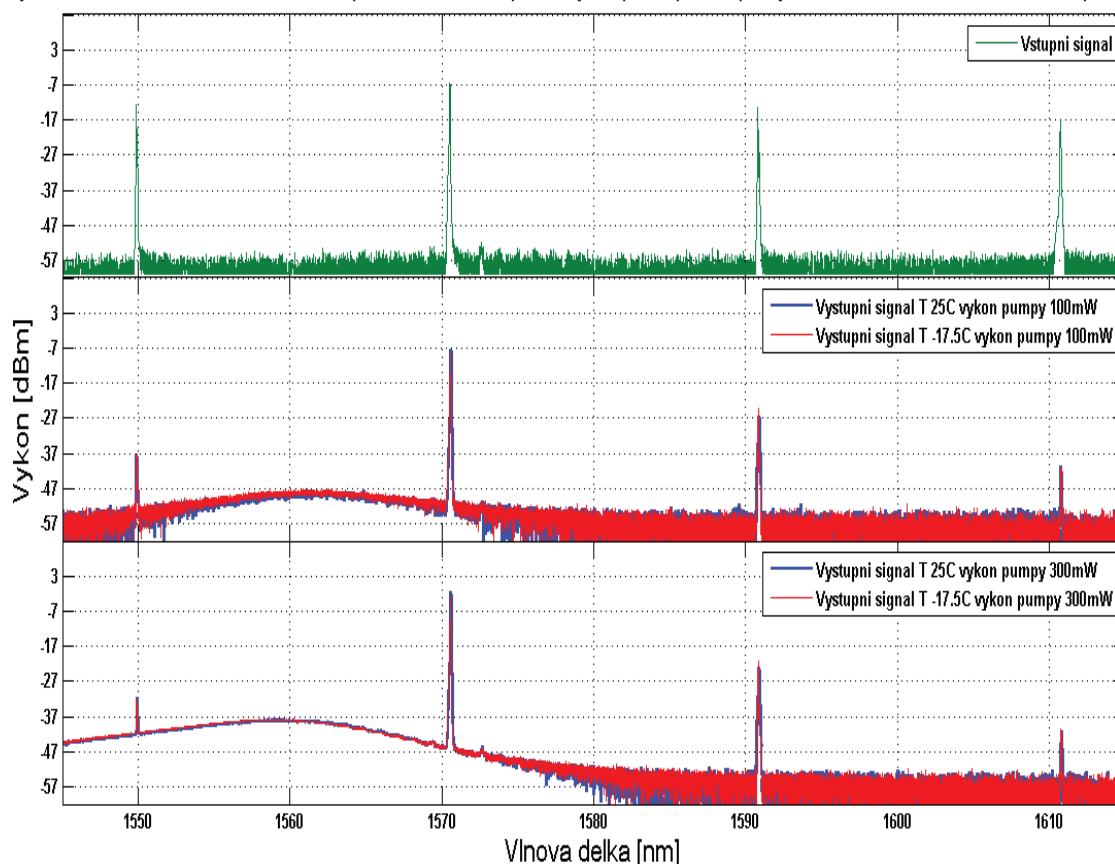
Prvním experimentálním vláknem, které bude testováno za účelem posouzení vlivu teploty bude právě toto vlákno, aby bylo dodrženo návaznosti a konvence stanovené při prvním měření. Jak již bylo zmíněno několikrát, vlákno vykazuje velkou hodnotu vložného útlumu, který činí 20dB na metr délky pro vlnovou délku 1530nm a dále pro vlnovou délku 980nm 10dB na metr. Na této délce se přenáší signál dodávaný optickou pumpou.

Následující obrázek zachycuje porovnání downstream směru vlákna pro teploty 25 a -17.5 stupňů s výkony pumpy 100mW a 300mW pro trasu o délce 20km. V horní části se nachází vykreslený signál, který byl změřen za optickou trasou. Jak je patrné výkon dodávaný SFP moduly o hodnotě 4dBm byl vlivem spojek a trasy utlumen přibližně o hodnotu 16dBm pro kanál 1550nm a o 21dBm pro kanál 1610nm. I přes to že v tomto směru lze vidět i upstream kanály, nejsou trasou nikterak ovlivněny, protože tento náměr je provedený v bodě, kdy teprve trasou projdou. Důvod proč je lze vidět je ten, že samotné vlákno obsahující multiplexovaný signál SFP modulů ve stejný okamžik přenáší upstream i downstream a proto se musí zákonitě objevit i ve spektru. Navíc spektrometry byly zapojeny do trasy tak, aby bylo možné pozorovat oba směry najednou.

Prostřední a třetí část obrázku představují grafy, které vyobrazují signály na výstupu zesilovacího vlákna SAE1. Hodnota upstream kanálů by se v tomto případě měla změnit adekvátně k situaci, protože se kanály nejdříve EDFA zesilovačem zesílili a pak prošly trasou. Lze tedy tvrdit, že v případě měření downstreamu je zesilovač zapojený jako předzesilovač a pro kanály opačného směru

se chová jako výkonový zesilovač. Hlavní je ovšem to, že je třeba porovnat hodnoty výkonu před zesílením a po zesílení. Jak již bylo ukázáno v prvním měření, všechna experimentální vlákna mají svou výkonovou charakteristiku posunutou mírně ve směru k vyšším vlnovým délkám. Maximálního zesílení tedy dosahují v oblasti 1562 nanometrů. Tento fakt je velmi zřetelně vidět pro kanál s vlnovou délkou 1570nm, která byla zesílena a pak prošla optickou trasou. Výsledkem je že i tak proti vstupnímu signálu v první části byl tento kanál po vybuzení optického vlákna na 100mW zachován na stejné výkonové úrovni před tím než prošel trasou. V případě vybuzení vlákna na 300mW došlo dokonce k zesílení se ziskem 5dBm. To je jediný kanál, který byl zesílen. Ostatní byly po průchodu zesilovačem, ať už se jedná o downstream, kdy nejdříve prošly trasou a pak zesilovačem, či upstream, kdy prošly zesilovačem a až pak trasou, utlumeny. Nejhuře na tom dopadl kanál na vlnové délce 1610 nanometrů, jež byl utlumen o 23dBm z hodnoty -17dBm na hodnotu -40dBm v případě pumpování výkonem 100mW. Kanál 1550nm byl na tom lépe po průchodu trasou, než na výstupu zesilovače, to je způsobeno tím, že samotná výkonová charakteristika zesilovacího vlákna v oblastech 1550 a 1610 nedosahuje velkých hodnot, což je možné vidět v prvním experimentálním měření. Stále ovšem po vybuzení zesilovače 300mW je výstup o něco lepší, než v případě buzení 100mW. O zisku se ale nedá diskutovat. Kanál 1590nm je také v konečném důsledku utlumen. Ani zvýšení výkonu zesilovače tomu výrazně nepomohlo. Hraniční hodnotou přijímače SFP je -24dBm, což znamená, že skrze trasu by prošly pouze kanály upstream, zbytek by nebyl detektorem rozpoznán.

Výkonová charakteristika SAE1 porovnání vstupu s výstupem pro teploty 25 a -17.5 C Downstream pro 20km



Obrázek 6.9: Výkonová charakteristika SAE1 v CWDM pro 20km Downstream

Teplotní vliv je z grafu výše velmi těžké pozorovat, jelikož se pro obě dvě teploty křivky téměř překrývají lze konstatovat, že teplota neměla tyto kanály významný vliv. Rozdíl by byl lépe pozorovatelný kdyby bylo v síti větší množství kanálů, čímž by bylo snadnější vidět rozdíly mezi nimi a tím i potažmo chování vlákna v závislosti na teplotě a dotaci energie z pumpy.

Další obrázek zachycuje stejnou situaci. Nicméně trasa byla připojena naopak. Díky tomu, je vidět upstream po průchodu optickou trasou a pak následně po zesílení. downstream bude nyní v situaci, kdy bude možné pozorovat pouze jeho hodnotu po zesílení a následném průchodu trasou. Zde je vidět, že se situace vstupního signálu zcela otočila. Namísto vyšších výkonů v případě upstream kanálů je nyní vyšší výkon v případě downstream směru. Důvodem je to, že kanály 1550nm a 1610nm jsou změřeny těsně za multiplexorem. kanály 1570nm a 1590nm jsou utlumeny vlivem 20km trasy. Takto vypadá spektrum před průchodem skrze zesilovací vlákno.

Výstupní signál po zesílení je zobrazen v případě pumpování 100mW a 300mW. Pro 100mW je vidět že nejlépe na tom je signál 1570nm, který byl zesílen o 3dBm pro signál teploty 25°C. V případě -17.5 stupňů došlo k mírnému posunutí globálního maxima tak jak je popsáno v prvním měření, díky tomu dojde k většímu zesílení tohoto kanálu, proti vstupnímu signálu je tedy zesílen o 5dBm. Při nižší teplotě dojde i k většímu zesílení kanálu 1590nm.

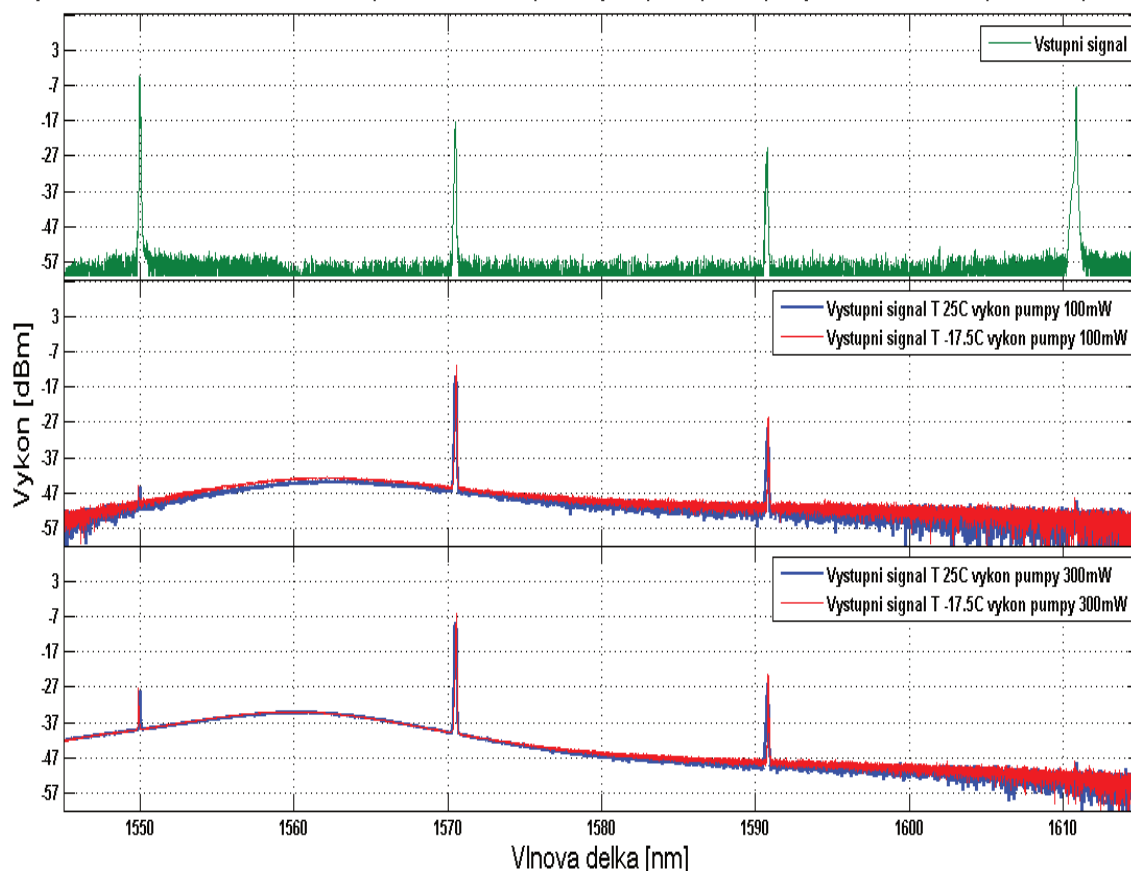
Ať už je zesilovací vlákno buzeno 100mW, nebo 300mW výkonu k zisku dojde v porovnání se vstupním signálem opět pouze v případě kanálu 1570nm. Maximálního zisku pro tento kanál tedy bylo dosaženo v případě pumpování s výkonem 300mW a teplotou -17,5 stupňů, 10dBm. Naopak nejhůře na tom je opět kanál 1610nm. Ten byl experimentálním vláknem zcela utlumen a jeho výkonová úroveň dosahovala hodnoty -47dBm, což je výkon, který spektrometr sám nebyl téměř schopen rozpoznat od výkonu šumu. Přijímač SFP modulu by jistě tento kanál nedetekoval a komunikace by tedy ve směru downstream nemohla fungovat. Druhý downstream kanál 1550nm je také vláknem utlumen. Přijímač by jej dokázal přijmout až teprve při dotaci 300mW z optické pumpy a to by se pohybovala jeho výkonová úroveň na samotné hranici citlivosti detektoru přijímače.

V případě testování zesilovače je tedy vidět, že ve směru upstream došlo k projevu teplotního účinku a to tak, že se v C pásmu v případě 100mW výkonu pumpy nižší teplota ukázala jako výkonnější. Při pumpování 300mW tento rozdíl zanikl. Souhrnně jde ale říci, že nižší teplota způsobila to, že výstupní signál jednotlivých kanálů vykazoval v průměru asi 1 až 2dBm vyšší výkon, než v případě teploty nejvyšší. Stejně tak jako v případě směru downstream, kdy se při testování teplota opět významně neprojevila ve výkonovém spektru. V pásmu L vlnový délek pak kladná teplota způsobila to, že signál s vyšší dosahoval nižší hodnoty výkonu, tento jev ukazuje hlavně i zašuměná oblast spektra.

Výstupní signál ze zesilovače, který by dále putoval směrem k přijímači by byl detekován zase jedine v případě kanálu 1570nm a to hlavně díky tomu, že toto vlákno dosahuje svého globálního maxima výkonové charakteristiky při vlnové délce 1562nm.

Při použití trasy s délkou 20km by komunikace nemohla fungovat protože i v případě upstream i downstream by byly detektory schopny přijmout s jistotou pouze kanál 1570nm. Ostatní kanály se pohybují na hranici detekovatelnosti, nebo jsou pohlceny šumem úplně.

Výkonová charakteristika SAE1 porovnání vstupu s výstupem pro teploty 25 a -17.5 C Upstream pro 20km



Obrázek 6.10: Výkonová charakteristika SAE1 v CWDM pro 20km Upstream

Situace v případě 20km trasy nebude nikterak významná, protože se jedná o vzdálenost, při které by komunikace již nemohla fungovat. Zajímavostí je to, že by příčinou byl právě zesilovač, který představuje SAE1 vlákno. I přes to že měření bylo prováděno až pro trasu o délce 40km výraznějších změn ve spektru nebylo docíleno. Již při 20km je většina komunikace omezena. Následující obrázek zachycuje downstream komunikaci pro délku trasy 5km, jedná se o 15km kratší trasu.

Vstupní signál změřený před vstupem do zesilovače pro downstream kanály a pro upstream kanály před vstupem do zesilovače, ukazuje dostatečně velkou úroveň signálu, aby bylo stále možné detekovat na straně přijímače. Hodnoty výkonů se pro jednotlivé vlnové délky kanálu pohybují pro 1550nm a 1570nm v okolí -7dBm, což je přijatelná hranice. Pro kanály 1590nm a 1610nm jsou tyto údaje -15dBm a -7dBm. Hodnota, kterou vykazuje kanál 1590nm není zcela v pořádku vezmeme-li v úvahu, že tento kanál by měl být měřen v bodě těsně za zdrojem, a tudíž by měl dosahovat maximální úrovně. Příčina je přisuzována jednak tolerancí SFP modulu a jednak tím, že se může jednat o SpanningTree protokol, který na úrovni druhé OSI vrstvy eliminuje vznik smyček. Tak či onak úroveň výkonu jednotlivých kanálů jsou stále na tolik vysoké, že by přijímač neměl mít žádný problém je detekovat.

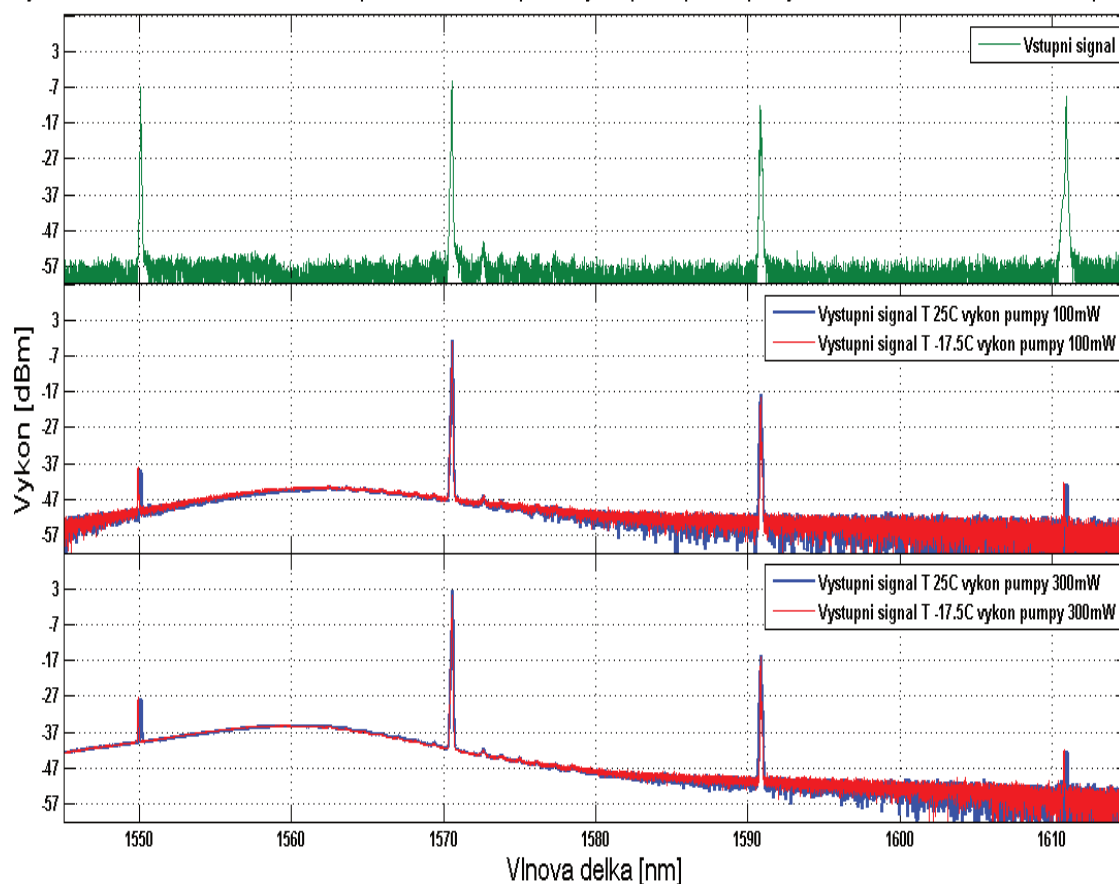
Při pohledu na prostřední spodní graf je jasné to co vyplývá i z pohledu 20km trasy. Experimentální vlákno znovu degraduje komunikaci v celé síti. I přes to, že pro kanály 1570nm dojde

k zesílení se získá 5dBm a 1590nm 4dBm, downstream kanály jsou opět utlumeny. V případě dopování 100mW jsou utlumeny tak že již není možné je přijmout. V případě 300mW má pak kanál 1550nm výkon, který je hraniční hodnotou přijímací schopnosti detektoru. Tedy upstream kanály prošly zesilovačem a pak trasou a dokázali na výkonové úrovni proti vstupnímu signálu získat, naopak Downstreamové kanály, které jsou zesíleny EDFA v roli předzesilovače byly naopak po překlenutí trasy na tom lépe, než na výstupu zesilovače.

Teplota se opět projevila minimálně. Spektrální výkonová charakteristika se v pásmu C při nižší teplotě dokázala vyhoupnout o přibližně 1dBm směrem k vyšším hodnotám, v L pásmu pak přibližně o tuto hodnotu klesá. Což je také rozdíl v případě zisku pro kanály 1570 a 1590 nanometrů. Oblast, kde je teplotní vliv alespoň trochu viditelný je především pouze šum, který je z hlediska komunikace neúčinný.

I při zkrácení trasy lze vidět, že zesilovač je v síti spíše přítěž, downstream kanály, které v porovnání s hodnotou výkonu na konci trasy před vstupem do zesilovače měly vyšší hodnotu výkonu mají na výstupu výkon na úrovni šumu. upstream kanály jistý zisk zaznamenaly. Na druhou stranu v jejich případě se nejedná o zesílení za trasou, které lze chápat jako před zesílení či inline zesílení kdyby následovala další trasa, ale jako výkonové zesílení, tedy zesílení signálu hned za zdrojem ještě před tím, než projde trasou.

Výkonová charakteristika SAE1 porovnání vstupu s výstupem pro teploty 25 a -17.5 C Downstream pro 5km



Obrázek 6.11: charakteristika SAE1 v CWDM pro 5km Downstream

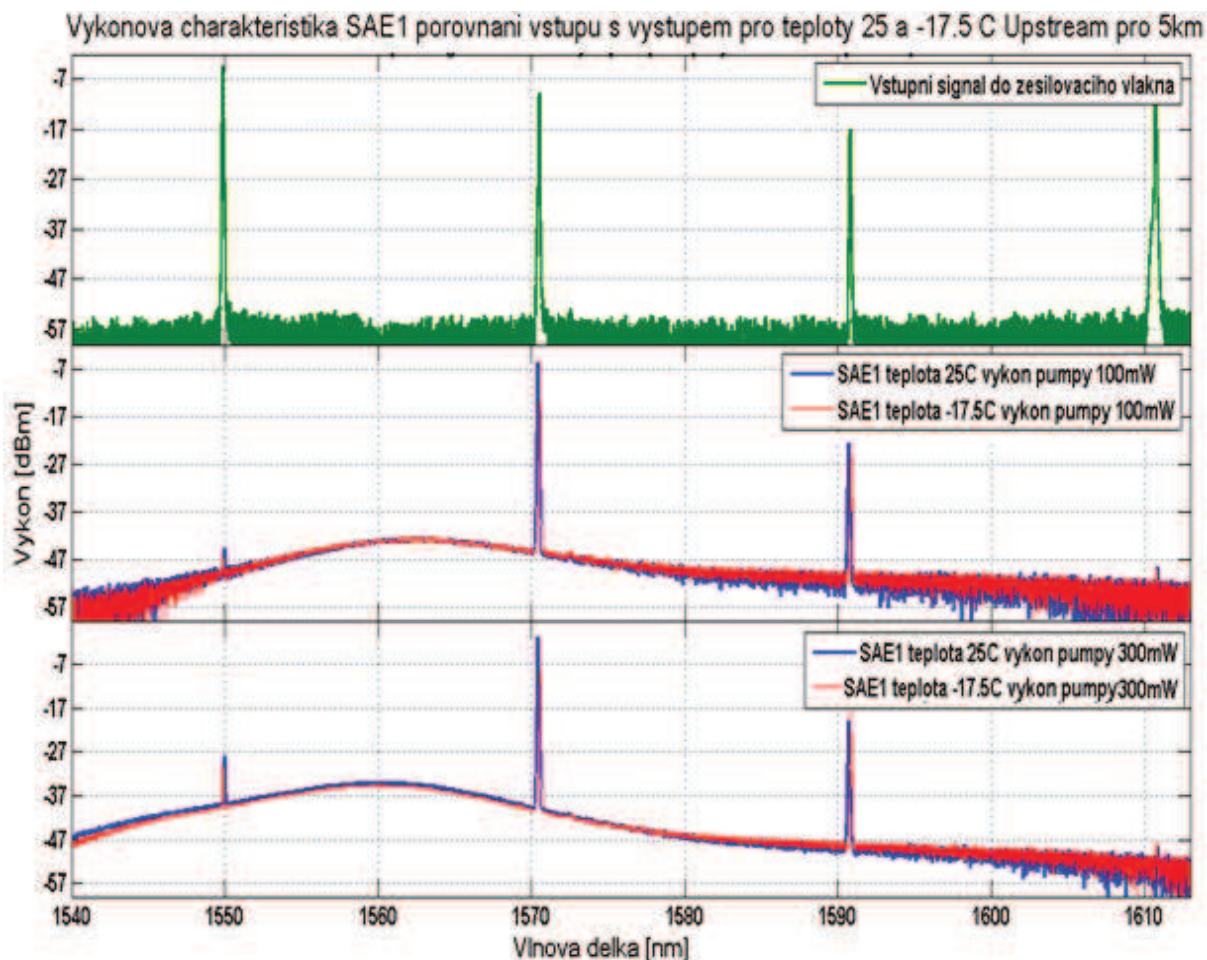
Následující obrázek zachycuje poslední zkoumanou situaci v souvislosti s tímto vláknem a tou je výkonová charakteristika ve směru upstream při trase 5km a zachování stejných podmínek jako doposud, tedy teploty a výkonů pumpy. Vstupní signál zelenou barvou nyní ukazuje upstream kanály již po překlenutí trasy 5km skrze konvenční optické vlákno, které se již na výkonu těchto kanálů podepsalo. Downstream kanály naopak jsou změřeny v bodě, kdy se nachází za zesilovačem, který v tomto případě v jejich směru průchodu sítě představuje výkonový zesilovač. Hodnota upstream kanálů je pro to nižší downstream kanály mají hodnotu -5dBm. Upstream mají v případě 1570nm -10dBm a pro 1590nm -17dBm.

Níže je pak vidět výstupní signál ze zesilovacího vlákna. Nejdříve je dopováno 100mW a následně 300mW. V obou případech je kanál 1570nm zesílen se ziskem až 9dBm pro 300mW. Pro kanál 1590nm nebyly zjištěny razantní změny, v tomto případě pro pumpování 100mW došlo k zisku o hodnotě 3dBm a v případě 300mW 6dBm. Downstream kanály jsou ale opět utlumeny. Příjimač nebude schopen je detekovat, což vede k přerušení komunikaci v síti směrem k účastníkům.

Vliv teploty lze pozorovat opět lépe, než jak je tomu v případě downstream měření. V C pásmu je patrné pro nižší vlnovou délku, že výkonový růst ze začátku vyzařovací charakteristiky v oblasti vlnových délek 1540nm až 1550nm je pro nižší teplotu menší. Následně pak nižší teplota v globálním maximu převyší teplotu vyšší a dále pak obě křivky pozvolna klesají. V případě kanálu 1570nm nedojde v zesílení k žádnému rozdílu, který by se dal přisuzovat teplotě, jedná se o desetiny dBm. Ani v případě vlnové délky 1590nm tomu není jinak. Rozdíl je sice větší ale pořád to není více jak 1dBm. Kromě toho, že downstream kanály jsou pohlceny šumem, ani pro ně se situace při změně teploty nijak zásadně nemění.

Vlákno při komunikaci v této síti opět představuje spíše problém, než-li řešení. Po průchodu vláknem o délce 5km by síť byla stále schopná komunikace. Ovšem na výstupu zesilovacího vlákna je vše jinak. Toto vlákno ze všech experimentálních vláken vykazuje nevyšší hodnotu vložného útlumu, právě to je příčinou proč jsou kanály tak moc utlumovány namísto zesílení. Aby mohly kanály být zesíleny bylo by třeba použít jiné vlnové délky ideálně v rozmezí od 1550 do 1570 nanometrů. Vzhledem k rozestupům kanálů v síti by ovšem namísto CWDM bylo mnohem lepší využít DWDM síť která je na užším rozsahu optického spektra schopná přenášet větší množství kanálů. Tím by se dalo tyto kanály přenášet v té části spektra, kde výkonová charakteristika tohoto experimentálního erbiem dopovaného optického zesilovacího vlákna dosahuje nejvyšších hodnot. Výsledkem by mohl být zisk takový, jakého dosahuje kanál 1570nm.

Následovat bude testování experimentálních vláken SGAE, tato vlákna mají menší hodnotu vložného útlumu, tím by mohlo dojít k tomu, že na jejich výstupu nebude signál tolik utlumený jako tomu je v případě SAE vláken. Vlnové délky 1550nm 1610nm by tedy mohly být zesíleny, nebo alespoň by nemusely být tolik utlumeny.



Obrázek 6.12: charakteristika SAE1 v CWDM pro 5km Upstream

6.3.2 Testování experimentálního vlákna SGAE-1

Vlákno SGAE1 bylo v prvním měření s využitím širokopásmového optického zdroje shledáno jako nejlepší. Jeho hodnota útlumu pro vlnové délky v okolí 1530nm a pro 980nm je 10 a 5 decibelů na jeden metr vlákna. Jedná se přesně o poloviční hodnoty v porovnání s vláknem SAE1. V porovnání s ním má ovšem menší množství dotace erbiových iontů. Díky tomu, v konečném důsledku po nasycení bude vlákno SAE1 zesilovat více. V případě postupného buzení vlákna je ovšem patrné, že dosahuje již při nižších hodnotách větší výkonové úrovně.

Následující graf ukazuje podobně předtím pohled výkonovou charakteristiku vlákna který zesiluje signál prošlý 20km trasou. Ve směru downstream signál prošel nejdříve trasou byla změřena jeho hodnota pak prošel EDFA zesilovačem a byl změřen zase. Zapojen jako předzesilovač. Ve směru upstream je signál nejdříve změřen, pak zesilovačem zesílen a následně tento signál projde skrze trasu na jejímž konci bude změřen znovu, jedná se tedy o zapojení výkonového zesilovače.

Vstupní signál má jak je vidět nižší hodnotu downstream kanálů, což je způsobeno tím, že jejich signál již prošel trasou. upstream kanály jsou změřeny za multiplexorem, jejich pouť teprve začíná.

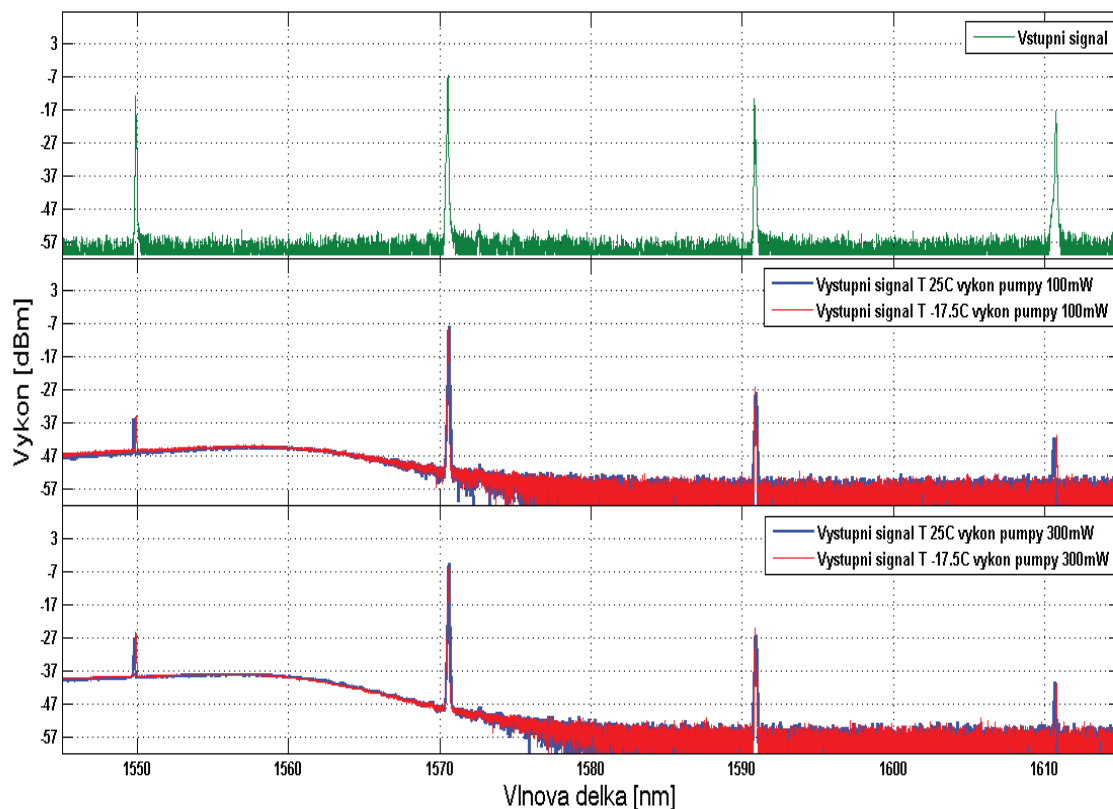
Výstupní signál vedoucí z tohoto experimentálního vlákna ukazuje, že nejlépe zesílen byl signál 1570nm, toto chování je stejné jako v případě vlákna SAE1. Důvodem je posunutá výkonová

charakteristika vlákna do L pásma o 20nm. Nejhuře naopak je na tom kanál 1610nm který by bez zesilovacích vláken síť naopak překlenout dokázal. Obdobná je situace i pro ostatní kanály 1550nm a 1590nm.

Modrá křivka představuje teplotu 25 stupňů Celsia a červená -17.5stupňů. Je vidět, že vlivem teploty se chování zesilovače v tomto případě neprojevílo. Pouze pro downstream kanály je ve spektru mírně posunut, jedná se přibližně desetiny až 1nm.

Rozdíly mezi buzením výkonem pumpy se mezi 200mW a 300mW projevil hlavně v případě kanálu 1550nm, který byl zesílen o 10dBm. Tento jev odpovídá tomu, co bylo zjištěno v prvním měření. Toto vlákno vykazuje při dostatečném vybuzení právě v oblasti vlnové délky tohoto kanálu, díky tomu se jeho výkonová úroveň zvětšila. Stále ovšem byl vláknem kanál v první řadě utlumen a ani detektor jej stále nebude schopen přijmout.

Výkonová charakteristika SGAE1 porovnání vstupu s výstupem pro teploty 25 a -17.5 C Downstream pro 20km



Obrázek 6.13: Výkonová charakteristika SGAE1 20km Downstream

Další obrázek ukazuje porovnání výsledků měření, kdy byla trasa přemístěna podle topologie doprava (Obr. 6.7). Jak je vidět vstupní signál pro downstream kanály má vyšší hodnotu výkonu, to protože signál teprve trasou projde. Naproti tomu upstream kanály mají svou hodnotu nižší. Tyto kanály již trasou prošly. Nyní je situace tedy otočená. Rozdíl výkonu vstupního signálu pro jednotlivé kanály v porovnání s downstream činí 10dBm.

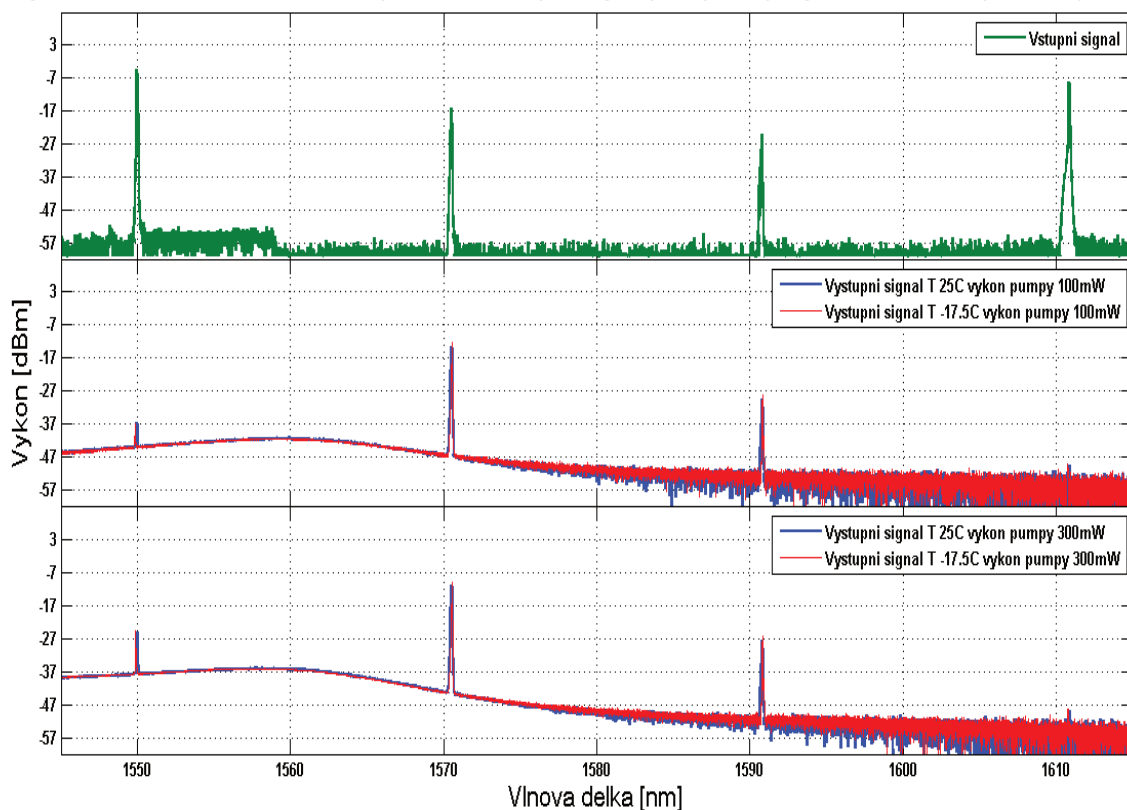
Výstupní signál ze zesilovacího vlákna je opět poměrně utlumený. Vlákno V tomto případě kanál 1570nm zesílilo více jak v minulém případě, to protože nyní měl o 10dBm nižší hodnotu.

Zesílení činí 3dBm v s dopováním 100mW a 6dBm s dopováním 300mW. Kanál šířící se na vlnové délce 1610nm v tomto případě dopadne hůř jako v případě downstream zapojení. Jeho úroveň je tak nízká, že jej lze považovat za šum. Tento jev je zajímavý vzhledem k tomu, že vstupní hodnota výkonu do zesilovače byla zpočátku vyšší, než pro downstream zapojení. Kanál 1550nm byl utlumen opět na hodnotu -37dBm s dotací 100mW výkonu pumpy. Při dotování 300mW se hodnota pohybovala v okolí -27dBm.

Teplota se v tomto případě projevila opět minimálně. Je vidět jenom pouze to, že v L pásmu došlo k mírnému posunutí signálu pro jednotlivé kanály směrem k vyšším vlnovým délkám. Hodnota posunu je ovšem minimální. V komunikaci se tedy teplota výrazně neprojevila.

Po zesílení signálu úspěšně k přijímači dorazí opět pouze signál 1570 v případě pumpování 100mW a v případě 300mW je situace stejná. Bez SGAE1 vlákna by signál prošel až na kanál 1590nm. Situace se tedy s teplotou opět výrazně nezměnila. Ať už se jedná o upstream, nebo downstream zapojení vlákno se v obou případech projeví stejně. K dosažení zesílení vstupního signálu by v nejlepším případě musely být kanály v oblasti od 1560 do 1580, jinde vlákno signál utlumí.

Výkonová charakteristika SGAE1 porovnání vstupu s výstupem pro teploty 25 a -17.5 C Upstream pro 20km



Obrázek 6.14: Výkonová charakteristika SGAE1 20km Upstream

V případě použití trasy o délce 20km se situace v porovnání s vlákem SAE1 nemění. Obě vlákna způsobí útlum tří ze čtyř celkem se přenášejících kanálů. Vliv teploty byl opět minimální a v samotném spektru výkonu se to projevilo pouze minimálně.

I přes to že se trasa 20km v porovnání se zesilovacími vlákny projevila převážně minimálně, následující grafy ukáží pohled na chování EDF vlákna znova s tím rozdílem, že délka trasy bude 5km. Jedná se tedy čtvrtinovou trasu.

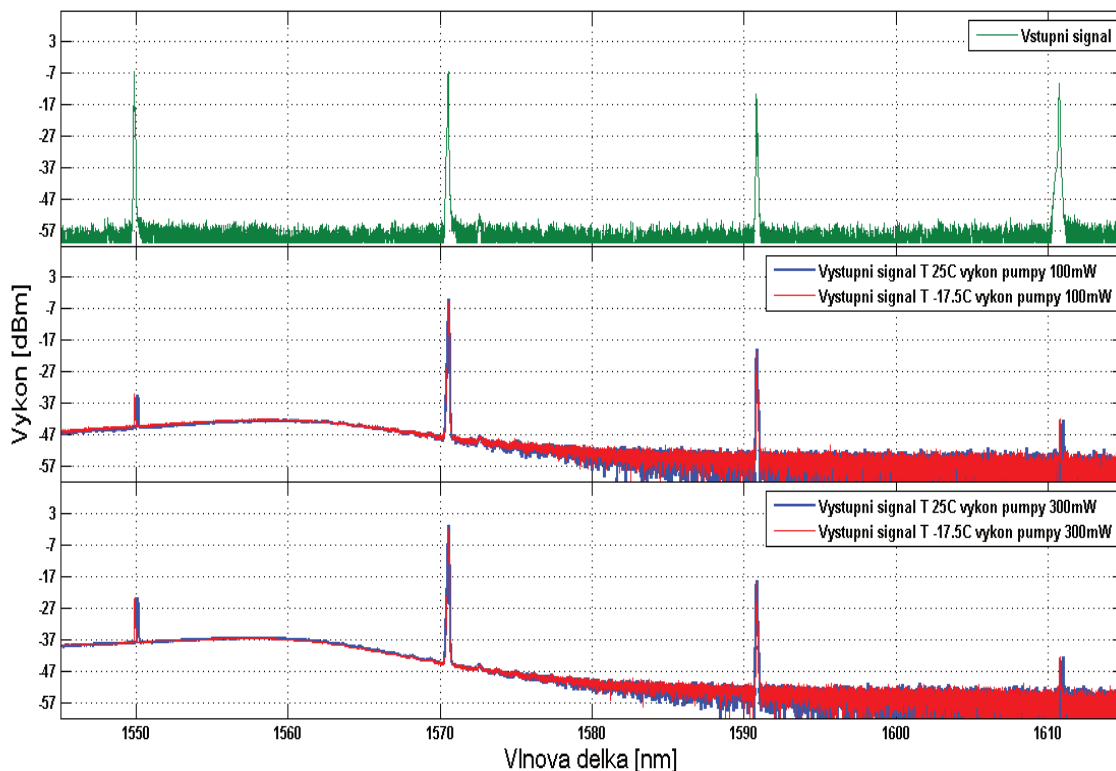
Optická trasa se nachází nalevo. Při pohledu na vstupní signál je možné vidět, že pro upstream kanály se výkonová úroveň nezměnila. Výkonové úrovně pro oba signály jsou měřeny hned za multiplexorem. Downstream kanály mají naopak hodnotu vyšší adekvátně k délce trasy.

Výstupní signál v případě dotování zesilovacího vlákna výkonem 100mW ukazuje, že zesílený je opět pouze kanál 1570nm. Všechny ostatní byly utlumeny. Zesílení ovšem není velké, pár jednotek dBm. Kanál 1610nm je utlumen stejně jako v minulých případech. Signál s vlnovou délkou 1550nm byl také utlumen téměř na stejnou úroveň.

Při vybuzení zesilovače na 300mW je vidět, že zesílení je již vyšší. Detektory by nyní dokázaly přijmout oba dva upstream kanály. Dále kanál 1550nm je na samotné hranici citlivosti detektoru, je tedy sporné, zda by jej bylo možné přijmout.

Teplota se opět neprojevila nikterak významně. Daleko markantnější vliv na síť mělo vlákno samotné. Konstatovat se dá to, že vlivem trasy se downstream výrazně nezměnil a vlákno dokázalo zesílit pouze jediný kanál.

Výkonová charakteristika SGAE1 porovnání vstupu s výstupem pro teploty 25 a -17.5 C Downstream pro 5km



Obrázek 6.15: Výkonová charakteristika SGAE1 5km Downstream

Ani v případě upstream směru, tedy připojením vlákna napravo se situace příliš nemění. Změna délky trasy se na zesílení signálu a výstupního výkonu neprojevila, vlákno tedy svým typickým výkonovým profilem odpovídá tomu co bylo naměřeno v prvním experimentálním měření. Zesílen byl

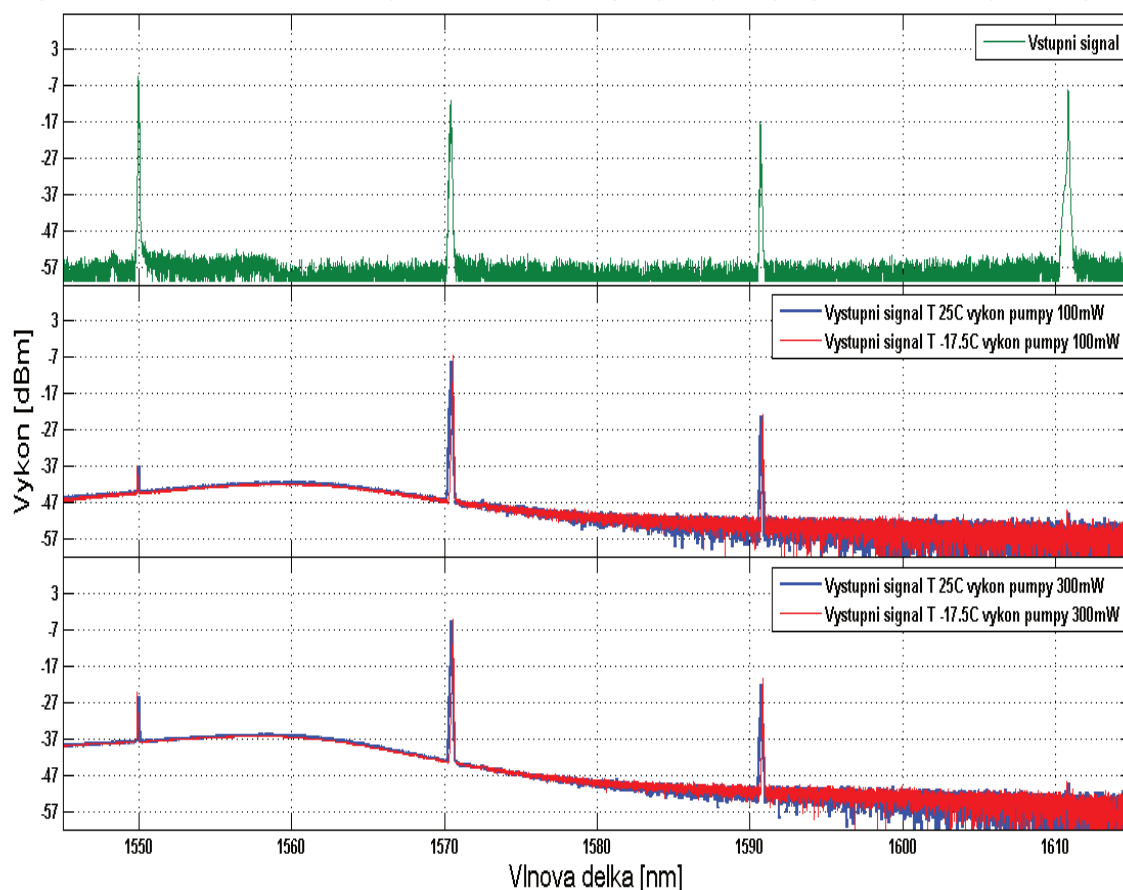
pouze signál 1570nm výstupní hodnota činila -6dBm. Postupně směrem k vyšším vlnovým délkám pak úroveň šumu klesá stejně tak jako i v případě užitečného signálu.

Hodnota výkonů pro jednotlivé kanály se vlivem teploty nezměnila. Kanál 1610 byl téměř pohlcen šumem, samotný měřicí EXFO spektrální analyzátor jej stěží detekoval.

Zapojení tohoto vlákna do sítě komunikaci značně omezí. Kanály by po překlenutí trasy 20km byly stále dost silné, aby bylo možné je přijmout, nicméně jakmile projdou SGAE1 experimentálním vláknem, které i přes to že v porovnání s ostatními vlákny dosahuje lepších výsledků, se v tomto případě příliš neprojevalo.

Pokud by měla komunikace fungovat, bylo by lepší použít vlákno spíše pro DWDM systém a použitím kanálů v oblasti vlnových délek 1560-1575nm., což je oblast ve které vlákno dokáže vstupní signál zesílit.

Výkonová charakteristika SGAE1 porovnání vstupu s výstupem pro teploty 25 a -17.5 C Upstream pro 5km



Obrázek 6.16: Výkonová charakteristika SGAE1 5km Upstream

6.3.3 Testování experimentálního vlákna SGAE-2

Předcházející vlákna, mezi sebou co se týká jejich vlastností a parametrů mají velké odlišnosti. Jak bylo vidět na jejich výstupních výkonových charakteristikách obě vlákna převážně komunikaci utlumují, teplotní vliv je minimální. Vidět lze pouze nepatrný posun kanálů v optickém spektru

směrem k vyšším vlnovým délkám. Dalším vláknem, které bude posouzeno při teplotním zatížení nasazené v CWDM síti bude vlákno SGAE2. Jedná se o vlákno, které se nepříliš liší od vlákna SGAE1, největším rozdílem je průměr jejich jádra vlákna a typ materiálu ze kterých jsou vyrobeny pláště. Díky tomu vykazuje toto vlákno mírné zvýšení útlumu. Pro vlnovou délku 1550nm je tato hodnota vyšší o 2dB na metr a pro 980nm o 1dB na metr vlákna. Větší rozdíl je ovšem v dotaci Er^{3+} iontů na kubický centimetr, kdy je tato hodnota v případě tohoto vlákna 11326×10^{16} , což je přibližně o dva tisíce více než v případě vlákna SGAE1.

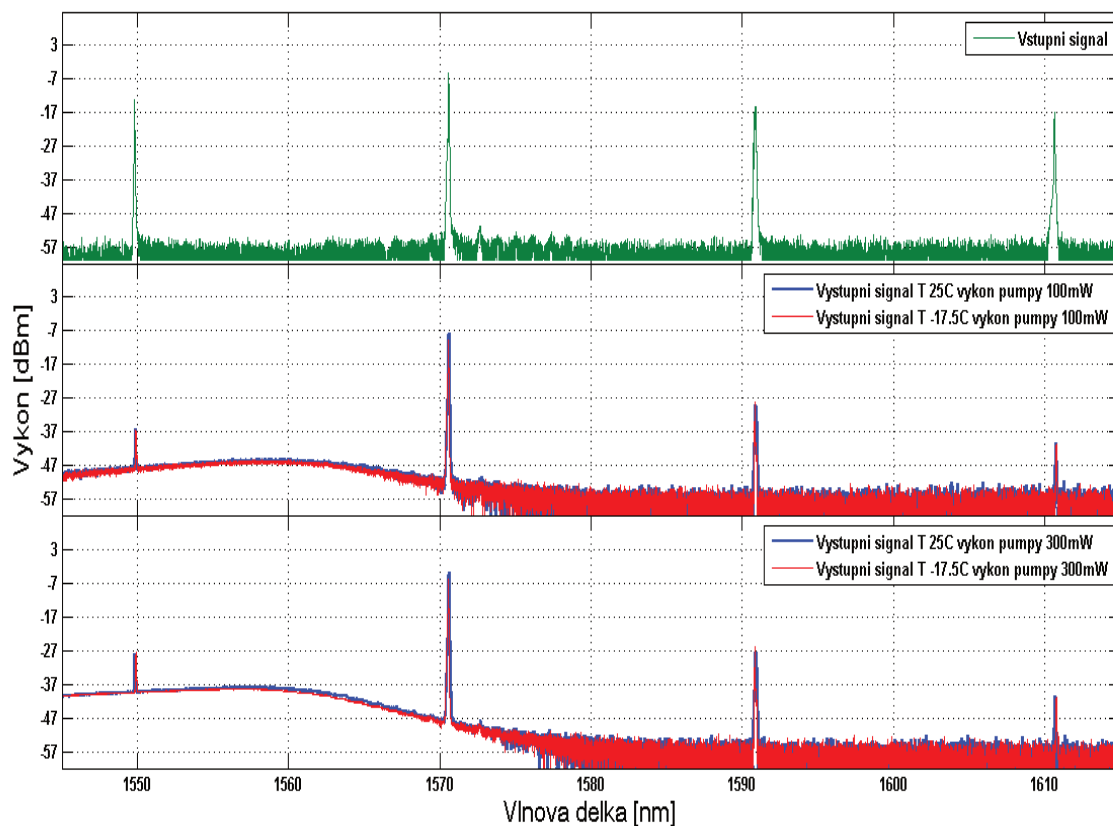
Následující obrázek ukazuje výkonovou charakteristiku vlákna v případě, že je optická trasa zapojena podle schématu více vlevo. Díky tomu bude náměr poskytovat informace o tom jak ve směru downstream byly kanály nejprve ovlivněny trasou a pak samotným zesilovačem. V případě komunikace upstream bude viditelné jaký byl signál v blízkosti zdroje, pak bude signál zesílen a projde trasou, načež jeho hodnota byla odečtena před detektorem. Zdrojový signál je podobný jako v případě ostatních vláken. Downstream kanály se již nachází za trasou a jejich výkonová úroveň poklesla vlivem útlumu trasy. Upstream kanály jsou změřeny v místě zdroje signálu hned za multiplexorem. Je viditelné, že jejich hodnota je srovnatelná s hodnotou downstream kanálů.

První graf nacházející se pod grafem vstupního signálu je výstup SGAE2 experimentálního vlákna a je na něm vidět, že se od výkonových charakteristik ostatních vláken nijak zvlášť nemění. Zesílení nebylo dosaženo v případě žádného z vláken, pouze kanál 1570nm byl na výstupu zesilovače na stejné výkonové úrovni jako na vstupu. Je to díky tomu, že se nachází v blízkosti místa, kde se výkonová křivka zesilovače, jak již bylo prokázáno v prvním měření, nachází v blízkosti globálního maxima. Ostatní kanály byly spíše utlumeny průchodem EDF vláknem. Downstream kanály byly utlumeny na minimální hodnoty, přičemž kanál 1610nm opět dopadl nejhůř díky tomu, že jeho odstup od šumu je velmi malý. Kanál 1550nm má sice vyšší výkon, ale jenom o hodnotu 2dBm, lze tedy říci, že tyto kanály jsou na tom podobně. Kanál 1590nm byl proti vstupní hodnotě výkonu utlumen o 10dBm. Díky tomu byla na výstupu jeho hodnota natolik malá, že spolu s downstream kanály nemohl být přijat na detektoru. Z pohledu funkcionality sítě by prošel pouze jediný kanál v tomto případě.

Pokud bude zesilovač vybuzen ze 100mW na 300mW což ukazuje poslední podgraf, je možné vidět že jednotlivé kanály úměrně tomu zvýšili svůj výkon na výstupu zesilovače. Zatímco při pumpování 100mW kanál 1570nm zachoval na výstupu přibližně stejnou hodnotu jako na vstupu, tak v případě vybuzení 300mW dosáhl zesílení pouze 3dBm. Kanál 1550nm měl výkon o 10dBm vyšší než v případě dotace 100mW, nicméně pořád byl velmi utlumený ve srovnání se vstupní hodnotou. kanál 1610nm svůj výkon nezměnil. Toto vlákno ve spektru 1610nm zesílení ani dosáhnout nemůže. I přes to že má posunutou spektrální charakteristiku směrem do L pásma, tato vlnová délka je pořád mimo rozsah vlnových délek, které vlákno zesílit dokáže.

Teplota se podobně jako ve všech ostatních případech neprojevila nijak markantně. Je vidět pouze nepatrný posun kanálů směrem k vyšším vlnovým délkám ve spektru. Tento posun je ovšem v jednotkách desetin až pár jednotek nanometrů.

Výkonová charakteristika SGAE2 porovnání vstupu s výstupem pro teploty 25 a -17.5 C Downstream pro 20km



Obrázek 6.17: Výkonová charakteristika SGAE2 20km Downstream

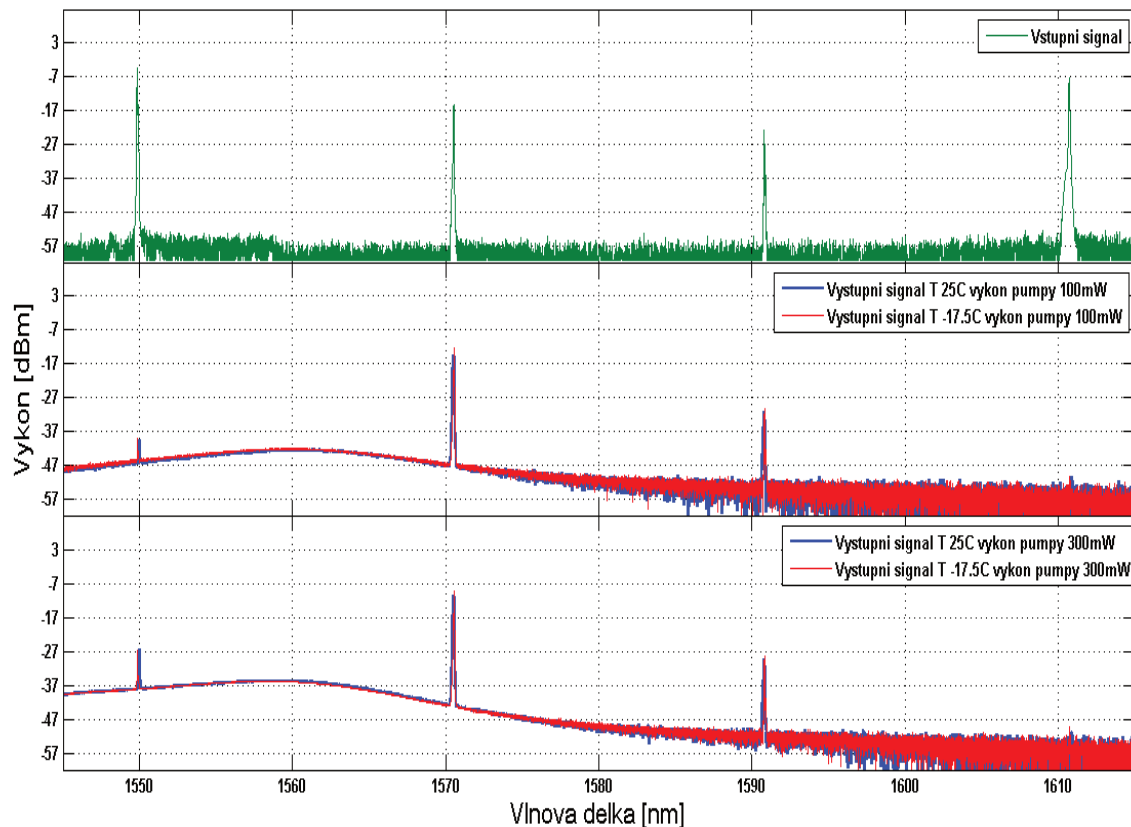
Další obrázek představuje situaci se stejně dlouhou trasou, nicméně nyní byla přemístěna vpravo podle schématu tak, aby se mohl posoudit vliv na upstream, který bude nejdříve 20 kilometrovým vláknem utlumen.

Vstupní signál zobrazuje upstream kanály již prošlé trasou a jejich hodnota výkonu je příslušně tomu utlumená. Downstream kanály jsou naopak naměřeny v bodě, kdy se nachází za multiplexorem před trasou a zesilovačem. Jejich hodnota je v okolí -7dBm. Jedná se sice o pokles v porovnání s tím že výstupní výkon SFP modulů je 4dBm, nicméně pořád je signál dostatečně silný na to aby prošel skrze síť a komunikace mohla fungovat. Kanál 1570nm se nachází na úrovni -17dBm což je už v blízkosti hranice citlivosti přijímače. Druhý upstream kanál je ovšem už za danou hranicí a už by jej po průchodu 20km trasou nebylo možné detekovat. K tomuto účelu by měl posloužit optický zesilovač.

Jak je patrné z výstupu SGAE2 vlákna při dotaci 100mW, kanál 1570nm bude jediný který dorazí k cíli, zesílení je ovšem nulové. Ostatní byly utlumeny, a jejich zesílení je záporné. Kanál 1610nm se úplně ztratil v šumu a to jak v případě dotace 100mW tak v případě dotace 300mW. Signál na vlnové délce 1550nm byl téměř utlumen a je sotva patrný mezi okolním šumem. Po vybudění vlákna výkonem 100mW se jeho hodnota pohybovala v okolí -40dBm, což je velmi nízká hodnota. po vybudění 300mW se pak o 10dBm zvýšila na -27dBm, ovšem signál je pořád stejně tak jako v případě i ostatních vláken utlumen a detektor jej nebude schopný detekovat. Při pohledu na kanály 1570nm a 1590nm po zvýšení výkonu pumpy nebylo dosaženo rozdílů.

Teplota se projevila opět jen nepatrným posunutím signálů ve spektru. V případě technologie CWDM je obtížné porovnávat takový vliv v případě pouhého počtu čtyř kanálů.

Vykonova charakteristika SGAE2 porovnání vstupu s výstupem pro teploty 25 a -17.5 C Upstream pro 20km



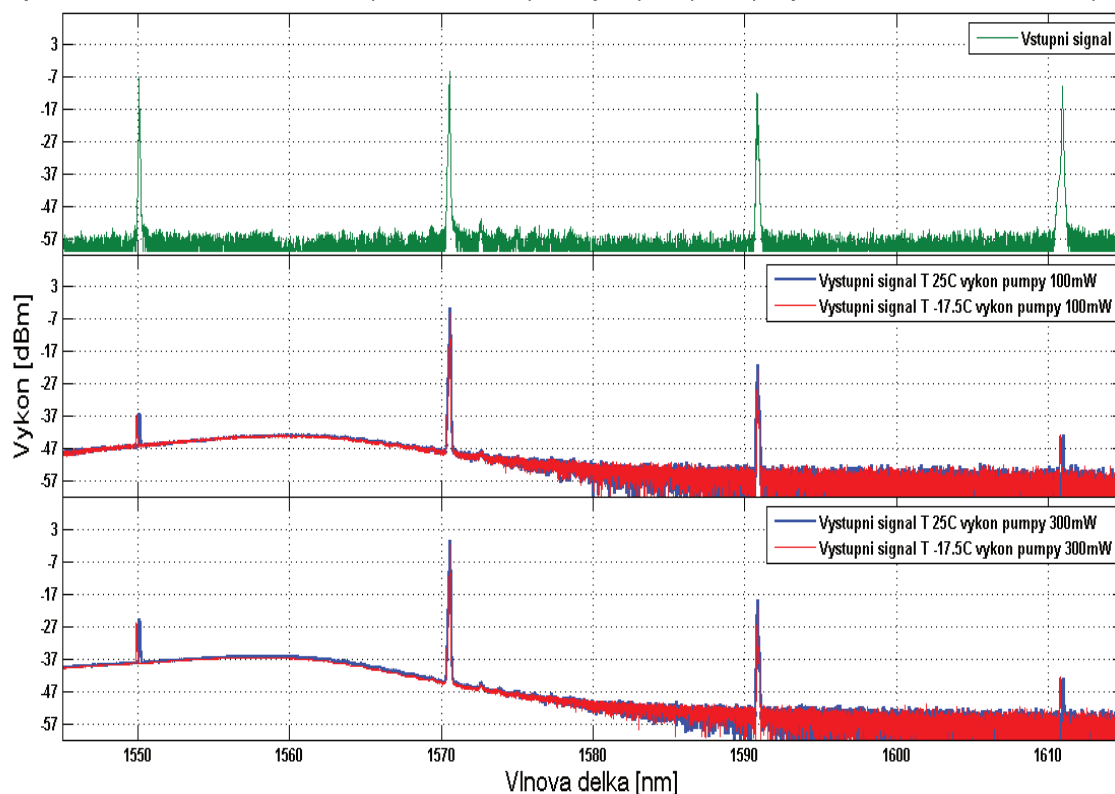
Obrázek 6.18: Výkonová charakteristika SGAE2 20km Upstream

Pro úplnost se snížila délka trasy na 5km a provedlo se nové měření. Výsledek v případě downstream je možné vidět v následujícím grafu na obrázku.

Vstupní signál je stejný jako v případě měření downstream směru pro 20km rozdíl je způsobený pouze útlumem vlákna. V případě downstream je ale tato hodnota pochopitelně nižší díky tomu, že se jedná o kratší trasu. Zesílení bylo dosaženo pouze pro kanál 1570nm. Při buzení zesilovače výkonem 100mW bylo zesílení nepatrné 3dBm a v případě 300mW o něco více 6dBm. Pořád se jedná o velmi malou hodnotu, ale stále lze tento kanál na straně detektoru přijmout. V případě signálu šířícím se na délce vln 1970nm je detektor jej schopen zachytit při dotaci 100mW, kdy dosahuje úrovně přibližně -20dBm a -18.5dBm v případě dotace 300mW. Kanál 1610nm je na tom podobně jako vždy. jeho hodnota nepřesahuje hranici -37dBm a proto je nemožné jej detekovat přijímačem. Kdyby tato hodnota klesla ještě o 7dBm nebylo by možné jej detekovat ani spektrálním analyzátozem.

V případě teploty se nedá stejně tak jako doposud diskutovat o nějakém vlivu. Jelikož mají vstupní signály tak vysokou úroveň výkonu signálu zesilovač je všechny spíše utlumí a s pouhými čtyřmi se nedá adekvátně tuto závislosti posoudit.

Výkonová charakteristika SGAE2 porovnání vstupu s výstupem pro teploty 25 a -17.5 C Downstream pro 5km



Obrázek 6.19: Výkonová charakteristika SGAE2 5km Downstream

V případě porovnání downstream komunikace pro délku trasy 20km a 5km je změna mezi jednotlivými výstupními charakteristikami malá. Následovat bude poslední graf zachycující komunikaci směrem upstream. Trasa je zapojena na napravo podle schéma na obrázku (Obr. 6.7).

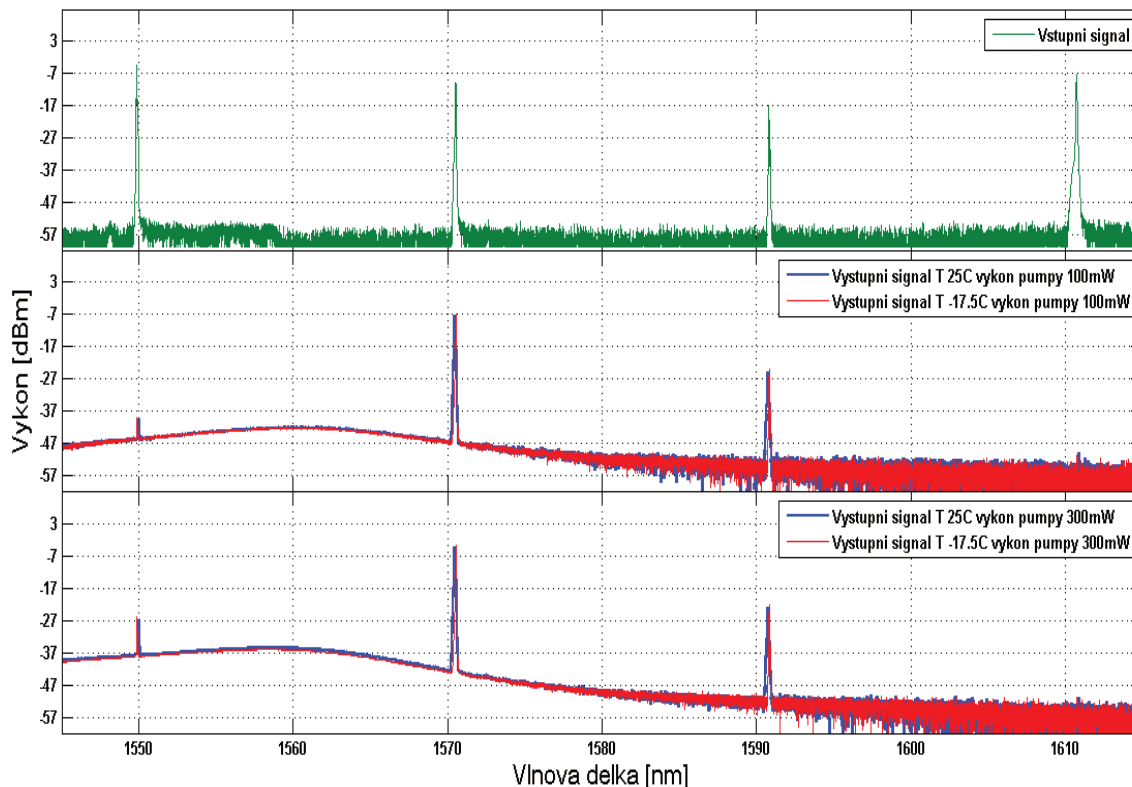
Na obrázku je vidět že tentokrát vlivem útlumu trasy byly postihnuty kanály ve směru upstream. Právě tyto kanály prošly nejprve trasou a pak až byly změřeny jakožto vstupní signál do zesilovacího vlákna, které bylo vybuzeno zařízením pumpy. Vstupní výkon všech kanálů se pohybuje v okolí hodnoty -7dBm. Výjimka je pouze kanál 1590nm, ten jejíž po překlenutí trasy značně utluštěný, jeho hodnota je -17dBm. Pořád je ovšem signál projít skrze trasu a detektor jej dokáže zachytit. To platí pro všechny kanály.

Na výstupu zesilovače v případě dotování vlákna výkonem 100mW je vidět, že kanál 1570nm byl zesílen a dosahuje hodnoty přibližně o 3dBm vyšší v porovnání se vstupní hodnotou do zesilovacího vlákna. Ostatní kanály byly utlumeny, hodnota zesílení je v jejich případě záporná. Útlum v případě kanálu 1590nm činí 7dBm. Nicméně přijímač na SFP modulu jej už zachytit nedokázal. kanál 1550nm byl utlumen na hodnotu -39dBm a nebude jej možné detekovat přijímačem. Kanál 1610nm byl naprosto pohlčen šumem, ani spektrální analyzátor jej nedokáže detekovat.

Následně byl tedy zesilovač vybuzen vyšším výkonem 300mW. Signál jdoucí na vlnové délce 1550nm dosáhl vyšší výkonové úrovně v porovnání s dotací o 100mW. Pořád je ovšem hodnota natolik malá, že nemůže být zpracován detektorem.

Teplotní vliv je opět minimální. Rozdíl mezi modrou a červenou křivkou je způsoben pouze v posunutí spektrální charakteristiky.

Vykonova charakteristika SGAE2 porovnání vstupu s výstupem pro teploty 25 a -17.5 C Upstream pro 5km



Obrázek 6.20: charakteristika SGAE2 5km Upstream

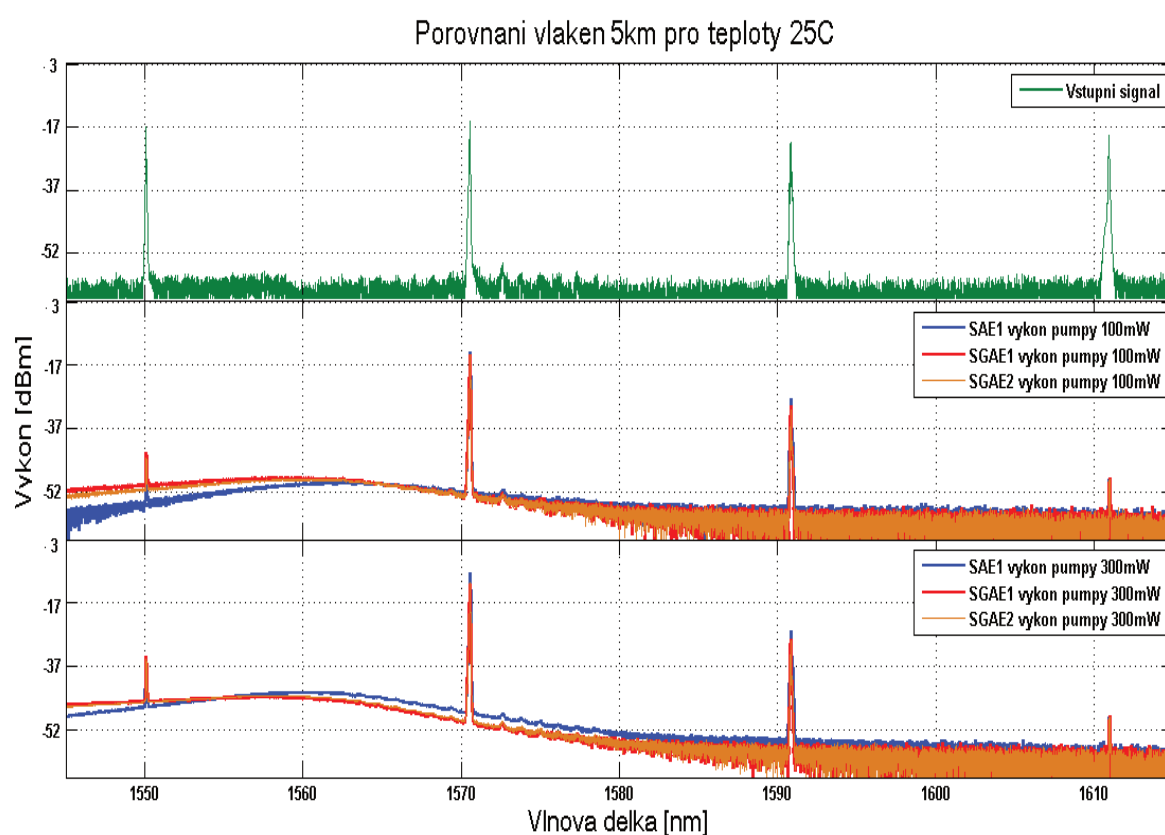
6.3.4 Srovnání experimentálních testovacích vláken v síti CWDM

Při pohledu na jednotlivé charakteristiky vláken je možné tvrdit to, že teplotní účinek se vzhledem k množství kanálů, velikostí vstupních výkonů signálů pozoruje velmi obtížně. V případě testování tohoto účinku se širokospektrálním zdrojem je viditelnější a to díky tomu, že signál připojený na vstupu zesilovače měl natolik nízkou úroveň že i v případě nižšího výkonu bylo možné vidět odlišnosti. Všechny vlákna se k vstupnímu signálu představujícího čtyři kanály projeví podobně. Zesílení bylo dosaženo pouze v případě 1570nm a to jeho hodnota nebyla nikterak významná v porovnání se vstupní hodnotou. Ve většině případů byly ostatní kanály utlumeny a lze konstatovat, že síť by lépe pracovala bez účasti experimentálních EDF vláken.

Pro porovnání nemá vliv to, zda byla optická trasa zapojena napravo, či nalevo jak znázorňuje schéma (Obr. 6.7). Tedy nehraje roli, zda je srovnání posouzeno z pohledu upstream či downstream. Důvodem je to, že experimentální vlákna jsou plně transparentní v obou směrech, tedy nejde o to kterým směrem signál vstoupí, nebo vystoupí z vláken. Následující obrázek ukazuje srovnání vláken při teplotě 25 stupňů. Trasa v tomto případě nebyla připojena.

Rozdíl mezi vlákny je viditelný především v C pásmu. Vlákno SAE1 má nejnižší výkonovou křivku při dopování 100mW. je vidět, že konkrétně kanál 1550nm byl tímto vlákem utlumen nejvíce, protože jeho hodnota je nižší než v případě vláken SGAE. Ty naopak v C pásmu dosahují větší

výkonové úrovni. Rozdíl mezi nimi samotnými je minimální skrze to, že rozdíl samotných parametrů vláken je minimální. V L pásmu se chová nejlépe vlákno SAE1 přesně tak jak bylo zjištěno již při prvním měření. Tento fakt potvrzuje i vyšší výkonová úroveň pro kanály v L pásmu. Pokud vlákna vybudíme výkonem 300mW je očividné, že rozdíl mezi nimi se v C pásmu zmenšil. To je způsobeno tím, že vlákno SAE má největší množství iontů erbia. Při dotaci 100mW byla jeho výkonová křivka do 1560nm nižší nyní při dotaci 300mW je tato hranice posunuta na vlnovou délku 1554nm. Od této hranice dále se projevuje větší množství erbia ve větší výkonové úrovni. Nejviditelnější je tento rozdíl od 1560nm do 1570nm. Také upstream kanály díky tomu dosahují větší úrovně signálu než je tomu v případě dotace 100mW, kde dominovali spíše vlákna SGAE. Na druhou stranu dokud nejsou vlákna dostatečně vybudena tak z důvodu nižšího vložného útlumu se zákonitě musí jevit situace příznivěji pro SGAE vlákna.

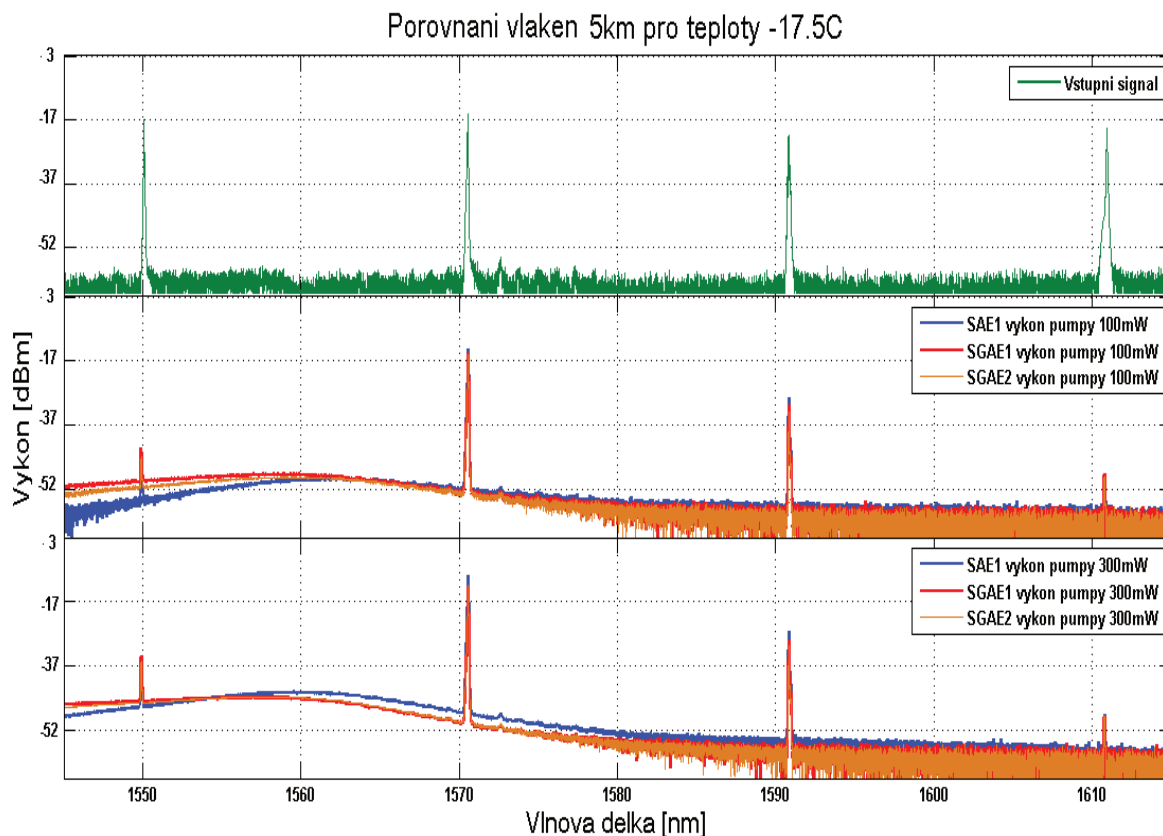


Obrázek 6.21: Porovnání vláken při 25 stupních v CWDM síti

Jak je tedy patrné při dostatečném vybudzení se chová nejlépe vlákno, které v prvním měření dosáhlo nejhorších výsledků, tedy vlákno SAE1. Na dalším obrázku je vidět srovnání experimentálních vláken pro stejné výkony ovšem při teplotě -17.5 stupňů Celsia.

Díky tomu, že se teplota významně neprojevila v průběhu tohoto měření je zřejmé, že ani srovnání vláken navzájem nemůže dosahovat odlišností, než jak tomu bylo v případě pro testování při 25 stupních. Toto tvrzení je podloženo obrázkem níže, který se až na pár maličkostí shoduje grafem popisujícím situaci pro 25 stupňů. Pro vlákno SAE1 je vidět, že při dotaci 100mW je v C pásmu při -17.5 stupňů Celsia více zašuměné než je tomu v případě 25 stupňů. Naopak v L pásmu je pak vidět, že fluktuace šumu je mezi vlnovými délkami 1570nm a 1580nm větší v případě teploty 25 stupňů než jak

je tomu pro nejnižší teplotu. Tento jev je pozorovatelný pro všechny tři vlákna. Z pozice zesílení, případně útlumu vstupního signálu do zesilovacího vlákna je ovšem situace pro obě teploty stejná. Vláknem SAE1 opět v případě nasycení dosahuje většího zesílení, než vlákna SGAE.



Obrázek 6.22: Porovnání vláken při -17.6 stupních v xWDM síti

Souhrnně je vidět, že teplota nijak výrazně neprojevila v případě nasazení zesilovače v síti. Většina kanálů v průběhu experimentálního měření byla utlumena kromě 1570nm. Důvodem proč se všechna vlákna chovají stejně je to, že bylo nasazeno příliš málo kanálů do sítě. Většího množství by nebylo možné dosáhnout až už díky vznikům smyček na úrovni L2 vrstvy OSI modelu, či k maximálnímu počtu SFP modulů, které mohou být připojeny do jednoho switchu. Příčinou tak velkého útlumu je to, že samotný vstupní signál má enormní hodnoty výkonu. zesilovací vlákna fungují efektivně především pro signály, jejichž vstupní výkon je mnohonásobně menší. v porovnání s intenzitou světla pumpy. Příliš velký vstupní signál vede k saturaci zesilovače. Ta může být viditelná právě pro kanál 1570nm pro něhož zesílení nedosahuje větší hodnoty jak 6dBm. Dalším důvodem je to, že samotné umístění kanálů ve spektru je nepříznivé vzhledem k rozpětí vlnových délek, které zesilovací vlákna zesilují nejefektivněji tedy 1560 až 1575nm.

Zajímavější by bylo testovat teplotní vliv při nasazení zesilovacích vláken do sítě s hustým multiplexem, kanály by se umístili v rozsahu 1560 až 1570nm a bylo by možné pozorovat lépe jakým způsobem se teplota projevuje. Výkon kanálů v případě DWDM systému je podstatně nižší, než výkon

dodávaný SFP moduly. Díky tomu by nebyl zesilovač satureván vlivem výkonu vstupního signálu a zesílení by bylo vyšší.

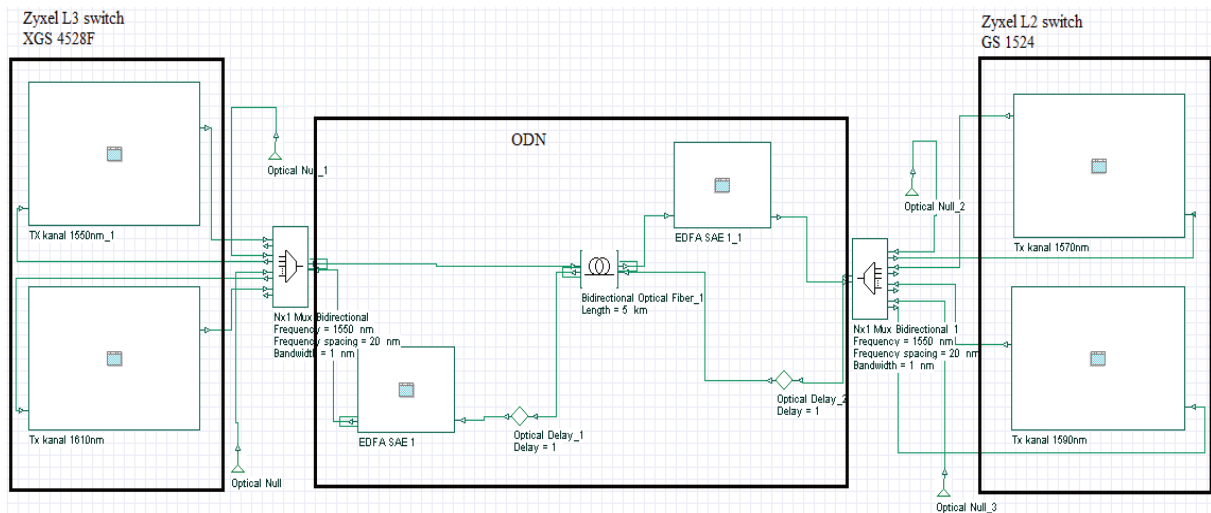
7 Simulace CWDM sítě při zapojení experimentálních EDF vláken v aplikaci Optiwave

V předešlých kapitolách byly provedeny experimentální měření za účelem otestování zesilovacích vláken. Nejprve byl vstupní signál tvořen širokospektrálním zdrojem a proto se jednalo o šumový signál bez přenosu užitečných dat. Toto měření bylo provedeno z toho důvodu, že bylo možné vytvořit přesný popis vláken v souvislosti s tím jak se chovají při teplotním zatížení pod bodem mrazu a jak se chovají jednotlivá vlákna v případě postupného buzení. Pak byla vlákna srovnána mezi sebou.

Další částí experimentálního měření bylo nasadit vlákna na reálnou optickou pasivní síť CWDM s hrubým multiplexem, kde jsou data přenášena v kanálech. Cílem bylo zjistit, jak se teplotní zatížení projeví v reálných podmínkách.

Tato kapitola se zaměří na provedení simulace, která bude odpovídat v rámci možností co nejvíce je to možné podmínkám druhého experimentálního měření v síti CWDM. Výstup simulace by pak měl být porovnán s výsledky, které byly naměřeny experimentálním měřením.

Na obrázku níže je topologické zapojení sítě v Optiwave systému. Nalevo je možné vidět dva bloky tvořící SFP moduly připojené do L3 switche Zyxel XGS, který představuje komunikaci ze sítě směrem downstream. Ve středu je možné vidět ODN, tedy optickou distribuční síť, jež je tvořena optickou trasou. Při reálném měření se trasa fyzicky přepojovala mezi zesilovačem tak aby došlo k záměně pořadí za účelem testování vlivu na upstream a downstream kanály. V rámci simulace je ovšem možné si blok tvořící EDF vlákno zkopírovat a vložit jej separátně jak pro směr downstream tak i pro upstream. Díky tomu bude možné simulovat oba dva směry současně. Napravo je část sítě kterou v experimentálním měření představoval druhý switch GS 1524.



Obrázek 7.1: Topologie optické sítě s EDFA zesilovačem

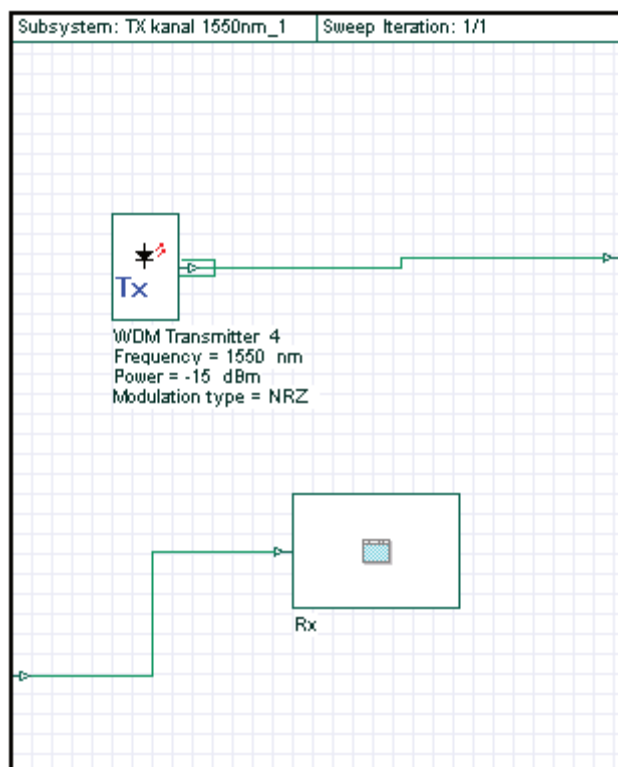
Vysílací i přijímací části jsou tvořeny dvěma bloky, každý z nich obsahuje WDM TX vysílač, což je komponenta, která je schopná vytvořit výstupní optický signál již s kódováním tak jak jej tvoří SFP moduly. Každý WDM TX byl nastaven podle parametrů SFP, tedy výstupní vlnová délka, výkon a spektrální šířka kanálu.

Vlevo se tedy vysílají kanály na vlnových délkách 1550nm a 1610nm a vpravo naopak 1570nm a 1590nm. Dalším prvkem jsou multiplexory. K tomuto účelu byly využity dvou portové prvky, jedná díky čemuž byly schopny přenášet signál v obou směrech tak jak tomu je i v případě reálného měření. V obou směrech signály následně putovaly do optické trasy. V rámci simulace bude pro trasu nastavena sweep funkce. Jedná se o schopnost v průběhu simulace měnit jednotlivé parametry vlákna a simulovat chování pro každý z nich. V rámci této funkce se bude měnit pro optickou trasu její útlum, hodnota chromatické disperze a hodnota polarizační vidové disperze. Tyto hodnoty budou korespondovat s těmi, které byly změřeny v průběhu testování optické sítě v předcházející kapitole. Za optickou trasou se nachází experimentální EDF vlákna pro něž byly nastaveny všechny dostupné parametry tabulky parametrů (Tab. 1.9).

7.1 Vysílací a přijímací jednotky

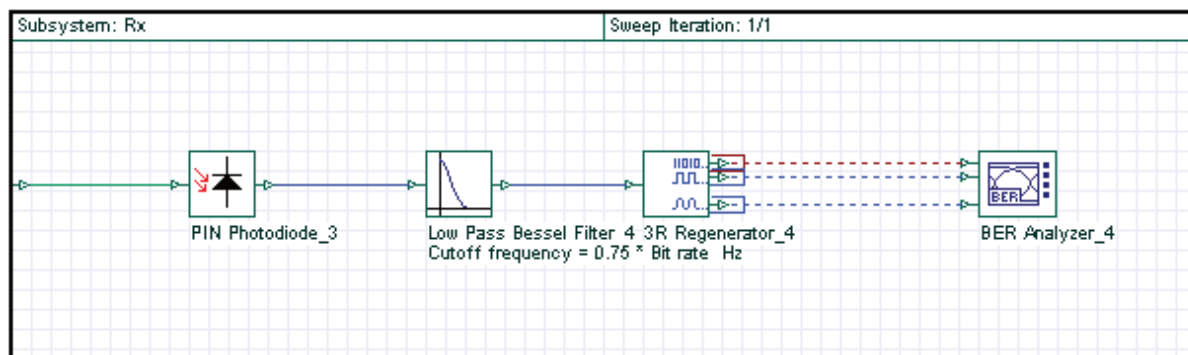
Na dalším obrázku je vidět vysílací jednotka. Každý SFP modul je vybaven vysílačem a detektorem. Zatímco vysílač vysílá pouze na konkrétní vlnové délce, přijímač má větší šířku pásma.

Jak je vidět vysílací část je tvořena pouze WDM Transmitterem, který svítí na vlnové délce 1550nm s výstupním výkonem -15dBm. typ kódování je NRZ, což je kódování bez zpětného návratu k nulové hodnotě. na obrázku je vidět i blok přijímací jednotky.



Obrázek 7.2: Zapojení vysílače

Následuje obrázek na kterém je vidět zapojení optického detektoru. K detekování elektromagnetického záření je využita fotodioda PIN, převádí optický signál na elektrický. Následuje filtr typu dolní propust (Besselův filtr), který filtruje vysokofrekvenční šum. Dalším prvkem 3R regenerátor pro obnovu signálu. Pro vyhodnocení síťové komunikace je použit BER analyzátor.



Obrázek 7.3: Optický detektor přijímače

Následující tabulka ukazuje jednotlivé výkony změřeny pro každý z kanálu v síti, když ještě nebyl zapojen EDFA zesilovač. Jedná se o hodnoty zobrazeny ve spektru k vidění na obrázku výše (Obr. 6.4). Takovéto hodnoty budou nastaveny pro jednotlivé kanály i v rámci simulace.

Tabulka 1.16: Nastavení výkonu vysílačů

vlnová délka [nm]	Optický výkon [dBm]
1550	-15
1570	-16
1590	-24
1610	-17

7.2 Optická distribuční síť

Tato část sítě představuje trasu skrze kterou putuje signál od vysílače k přijímači. skládá se z CWDM multiplexorů a demultiplexorů, optického vlákna, které v závislosti na měřené délce trasy bude adekvátně dlouhé a EDF vlákno připojení vždy za trasu.

Jako globální parametry celé simulace byly zvoleny hodnoty, které jsou doporučované výrobcem jednotlivých switchů od firmy Zyxel. jedná se o přenosovou rychlost jednoho Gigabitu za vteřinu, délka sekvence 64 bitů a počet vzorků na bit byl stanoven na jedna. Takto připravená topologie byla následně simulována.

Jelikož v průběhu experimentu byla testována tři vlákna. V musí být simulace provedena pro každé vlákno. V simulaci se tedy bude nacházet EDF vlákno, kterému budou upraveny parametry podle tabulky níže. Simulovat lze spoustu jiných parametrů zesilovacích vláken. naneštěstí množství informací, které bylo možné o vláknech získat není tak obsáhlé. Nastaveny budou tedy pouze dostupné parametry. EDFA zesilovač se skládá ze dvou komponent. První z nich je čerpací laser. Jak bylo prováděno po celou dobu experimentálních měření tak bude provedeno i v rámci simulace. K tomuto účelu bude tedy využita pumpa svítící na vlnové délce 980nm. Její výstupní výkon se nastaví na hodnotu 100mW, protože jak již bylo dokázáno v průběhu experimentálního měření změna hodnoty výkonu pumpy ovlivnila výsledný výkon kanálů. Naneštěstí ovšem dopad na optickou síť byl stále stejný a tři ze čtyř kanálů nemohli po trase přenášet svůj signál až k přijímači. Díky tomu, že se jedná o nestandardní erbiem dopovaná optická vlákna, jejich hodnota populace Er^{3+} iontů na kubický

centimetr je natolik malá, že Optiwave nedovoluje tuto hodnotu nastavit, tuto hodnotu se díky tomu nepodařilo nastavit a simulovat chování vláken s přesnějšími hodnotami výstupních signálů.

Tabulka 1.17: *Parametry testovaných vláken nastavené v simulaci*

Typ vlákna	Délka [m]	průměr jádra [μm]	Er dop. Radius [μm]	NA	Er metastabil. lifetime [ms]	Koncentrace [Er ions /cc]
SAE1	10	5.2	5.2	0.15	10.7	18877 x 1010
SGAE1	15	3.9	3.9	0.2	10.2	9438.5 x 1010
SGAE2	14	5	5	0.17	10.2	11326 x 1010

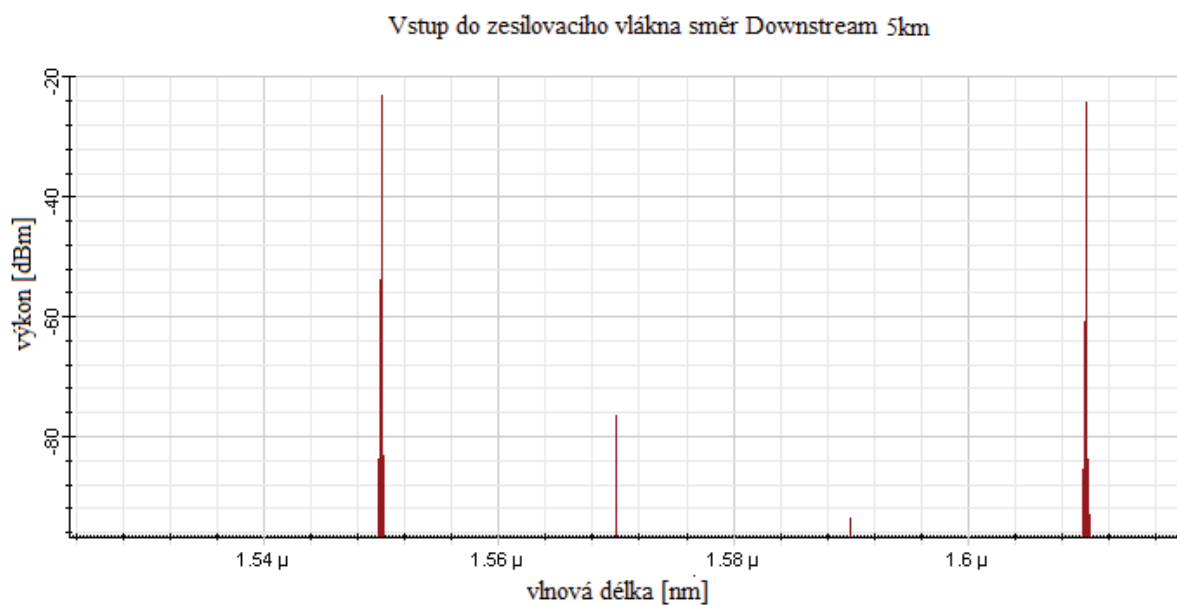
Následující tabulka ukazuje, jaké hodnoty byly nastavovány pro jednotlivé délky trasy, jedná se o hodnoty zjištěné na reálně zapojené optické síti v průběhu měření. Vláknem použité v reálném měření bylo označeno jako G.652.A.

Tabulka 1.18: *Parametry optického vlákna použité v simulaci pro trasy*

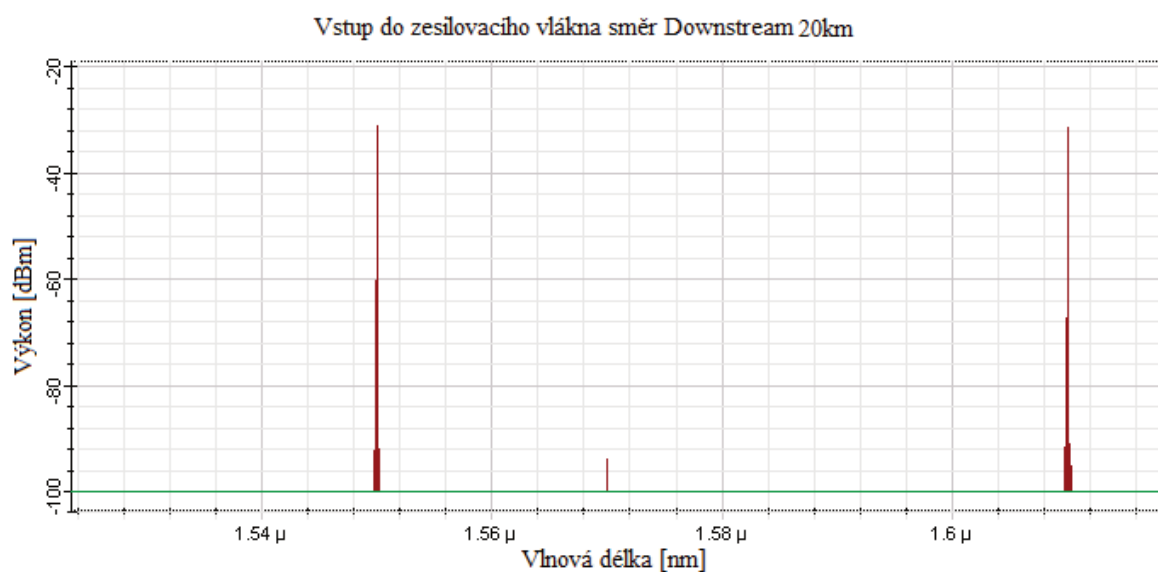
Trasa [km]	a [dB/km]	CD [ps/(nm x km)]	Slope [ps/nm ²]	Koeficient PMD [ps/km ^{1/2}]
5	0.513	16.625	0.298621	0.182
10	0.377	16.633	0.580505	0.429
15	0.564	16.389	0.876743	0.155
20	0.509	16.654	1.153881	0.63
25	0.526	16.648	1.534212	0.545
30	0.547	16.658	1.734524	0.616
35	0.543	16.050	2.002342	0.503
40	0.524	16.632	2.232424	0.547

Následující obrázky ukazují grafy vstupních signálů pro jednotlivé simulovaná experimentální EDF vlákna. Jelikož se jedná o srovnání dvou tras tak jak tomu bylo v případě druhého měření, jsou tyto grafy pouze dva a hodnoty kanálů které byly naměřeny byly stejné při všech ostatních simulacích.

Při pohledu na rozdíl hodnot všech kanálů je vidět, jak se obě dvě trasy podepsaly na hodnotě výkonů. V tomto případě nemá smysl pozorovat hodnoty upstream kanálů, jedná se totiž o odražené signálové paprsky které se dostaly na detektor spektrálního analyzátoru v průběhu testování. Důležité je ovšem to, jakým způsobem trasa ovlivňuje downstream kanály. Z obrázku je patrné, že kanál 1550nm při projití trasou 5km měl hodnotu -24dBm a při projití 20km klesla tato hodnota na -32dBm. Hodnoty v případě kanálu 1610nm jsou obdobné. Lze ovšem říct, že reálné hodnoty změřené v experimentálním měření se neshodují s hodnotami, které byly simulované. Simulace provádí výpočty na základě matematických predikcí, reálná situace zahrnuje vliv všech reálných parametrů. To je důvodem proč spolu simulace a experimentální měření tvoří nesoulad.

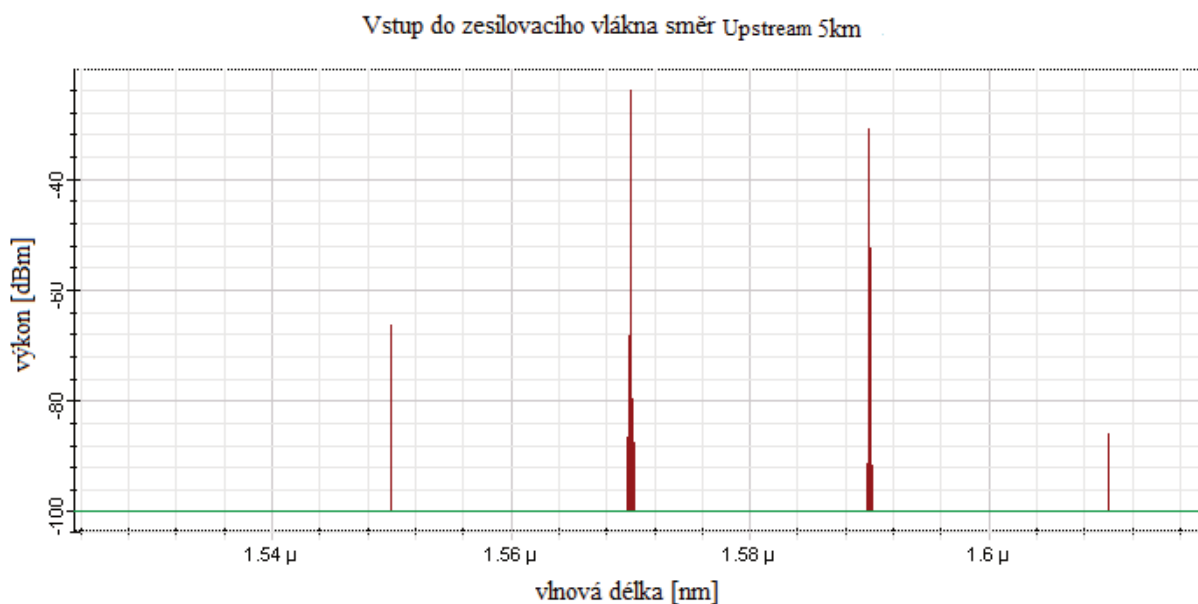


Obrázek 7.4: *Vstupní signál směr Downstream trasa 5km*

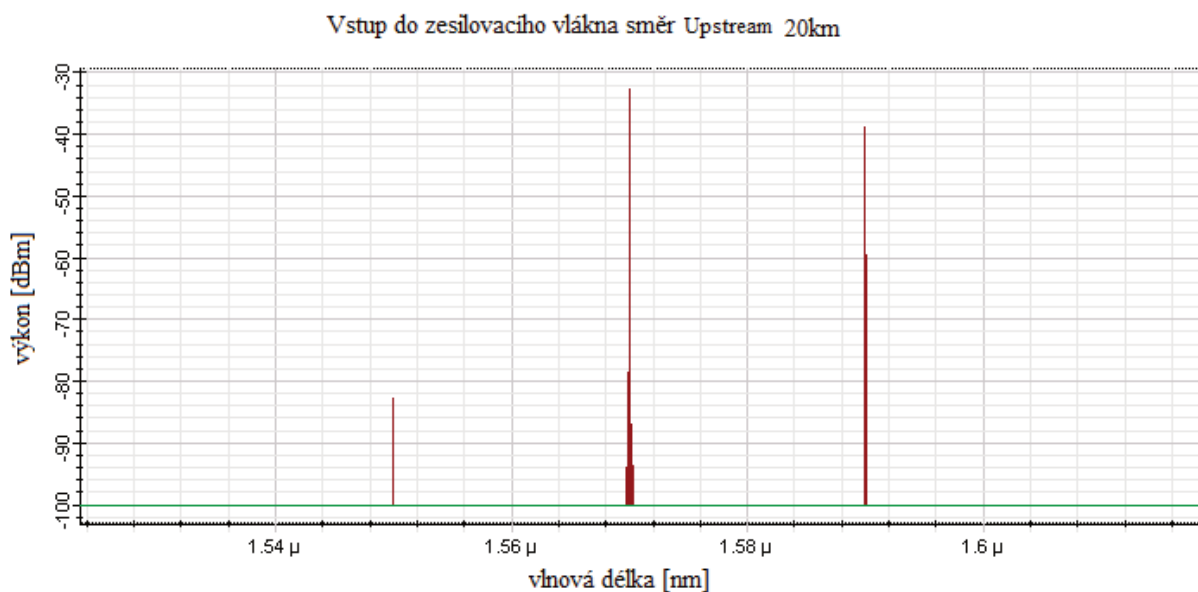


Obrázek 7.5: *Vstupní signál směr Downstream trasa 20km*

Další dva grafy jsou pro stejné trasy ovšem změřené ve směru upstream. Situace je jak je předpokládáno opačná. Hodnoty downstream kanálů nejsou relevantní, jsou nízké a ve spektru se objevují jen díky odrazům na trase. Důležitější pohled je ovšem na upstream kanály



Obrázek 7.6: Vstupní signál směr Upstream trasa 5km



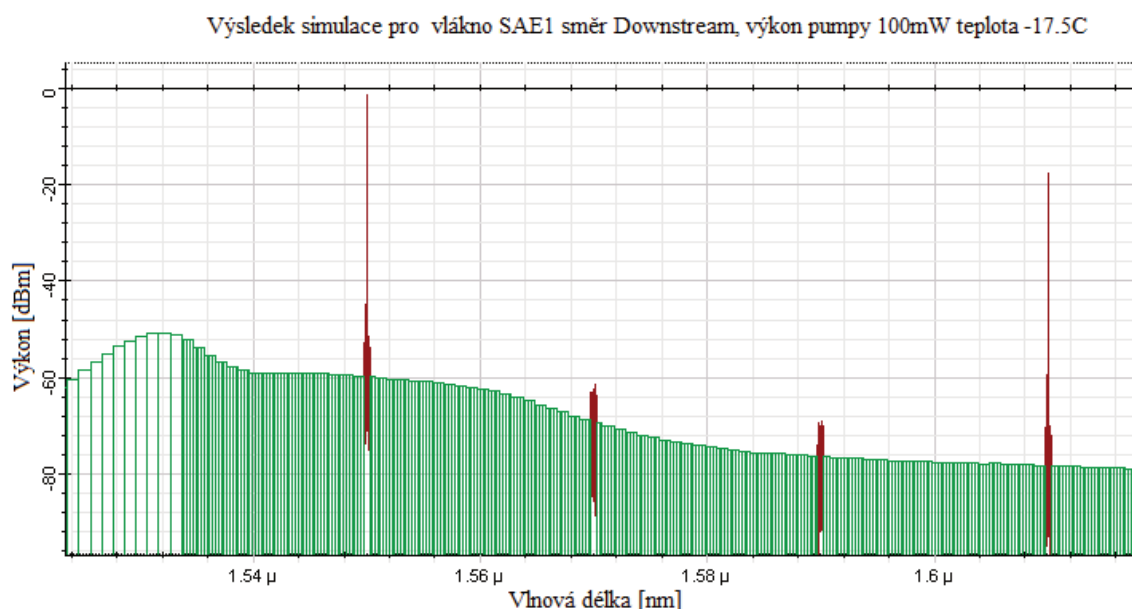
Obrázek 7.7: Vstupní signál směr Upstream trasa 20km

7.3 Simulace experimentálního vlákna SAE-1

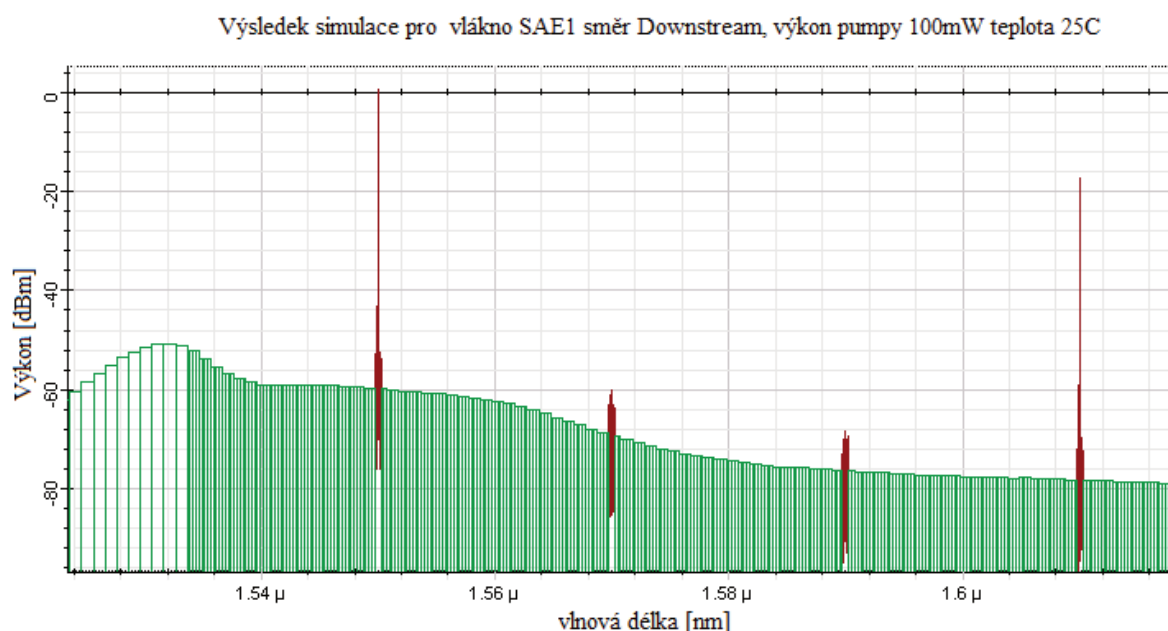
Prvním vláknem, které bude testováno v simulačním programu Optiwave je SAE1. Následující obrázky ukazují výsledek simulace pro upstream i downstream směr zapojení při teplotách -17.5 a 25 stupňů Celsia pro trasu 5km.

Jak je patrné z obrázku. Výstupní výkonové úrovně jednotlivých signálů se od sebe příliš neliší. V případě kanálu 1550 došlo k zesílení z -24dBm na -1dBm. Pro kanál 1610 bylo zesílení pouhé 4dBm. Vlivem teploty lze vidět že došlo k mírnému nárůstu zesílení o desetiny až jednotky dBm. Toto chování bylo zjištěno i při experimentálním měření. Nejedná se ovšem o významný vliv a

dá se konstatovat, že se teplota projevila minimálně. V porovnání s reálným měřením se ovšem všeobecně dá říct, že simulace a naměřené hodnoty spolu nesouhlasí. To je způsobeno zejména tím, že simulace kalkuluje chování na základě matematických funkcí. Reálné měření v kontrastu je ovlivněno spousty vlivů, které mají významný dopad na výsledek. Z toho plyne, že simulace má spíše informativní charakter a reálné měření má pouze doplnit. Upstreamové kanály pochopitelně zesíleny nebyly, protože se jedná o opačný směr a jejich výskyt ve spektru je způsobený pouze odrazy v síti.



Obrázek 7.8: Výsledek simulace SAE1 Downstream -17.5C 5km

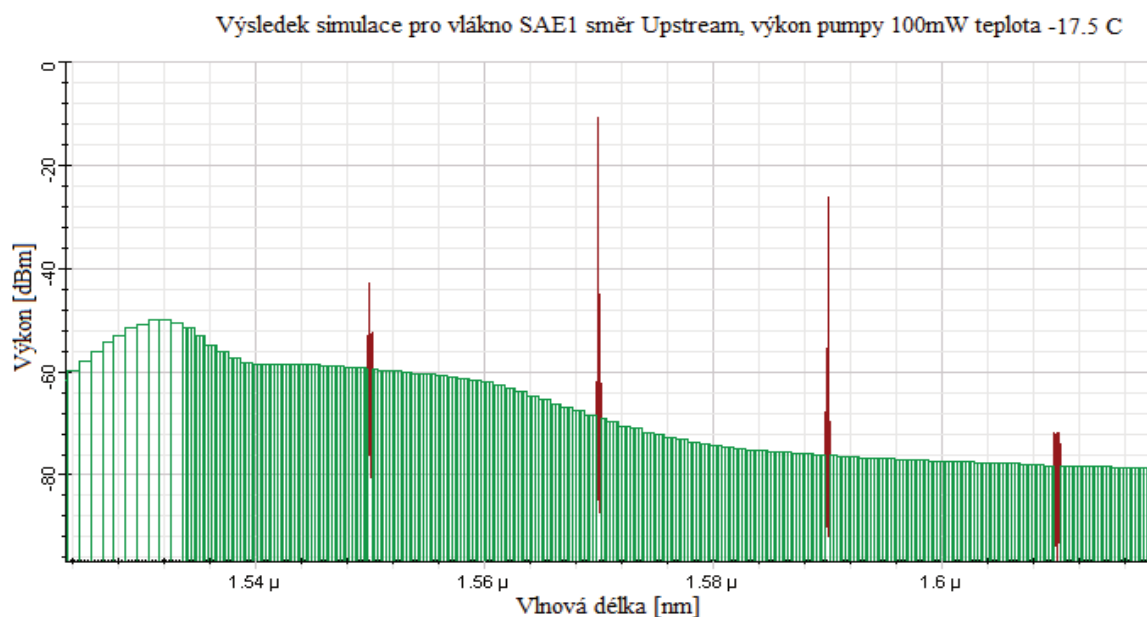


Obrázek 7.9: Výsledek simulace SAE1 Downstream 25C 5km

Následující obrázky ukazující chování vlákna pro upstream kanály pro obě dvě teploty a délku trasy 5km. Jak je vidět tak k zesílení vstupního signálu nedošlo. Právě naopak oba dva kanály byly utlumeny a to přibližně o hodnotu 6dBm pro kanál 1570nm a 14dBm pro kanál 1590nm. Toto je

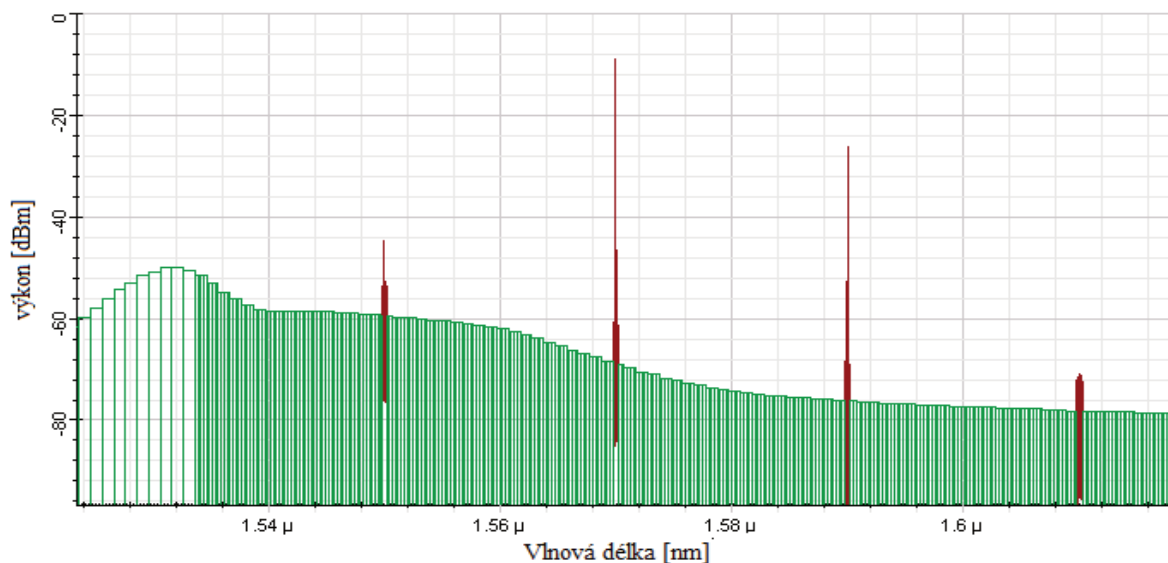
způsobené tím, že výkonová charakteristika v případě experimentálních vláken je o 30nm posunutá směrem do L pásma, díky tomu vlnovou délku 1570nm vlákna zesilují. Díky tomu, že k dispozici je pouze omezené množství informací o experimentálních vláknech, není možné uzpůsobit simulaci reálnému měření. Naopak zesílen byl kanál 1550nm téměř o 24dBm. Kanál 1610 zůstal nedotčený. V experimentálním měření měl tento kanál před zesilovačem vyšší úroveň výkonu než na výstupu v simulaci se hodnota před vstupem a po výstupu ze zesilovacího vlákna SAE nezměnila. Stav, který je souhlasný se stavem měření v případě simulace je to, že jako jediný kanál, který by SFP moduly dokázaly rozpoznat je 1570nm. Lze tedy říci že zapojení zesilovacího vlákna ve směru upstream je jediná situace kdy se simulace alespoň trochu podobá výsledkům reálného měření.

Pro úplnost budou situace vyobrazena opět při dodržení stejných podmínek. Ovšem tentokrát simulace proběhne podobně jako v druhém měření pro trasu 20km. Očekávání je takové, že některé kanály budou úplně utlumeny. Díky tomu by zesilovač na vstupu neměl být schopný tyto kanály zesílit. V reálném měření ovšem tyto kanály i po překlenutí tak dlouhé trasy měly dostatečnou úroveň výkonu, aby bylo možné je rozpoznat na detektoru. Po výstupu ze zesilovacího vlákna ovšem byly utlumeny.



Obrázek 7.10: Výsledek simulace SAE1 Upstream -17.5C 5km

Výsledek simulace pro vlákno SAE1 směr Upstream, výkon pumpy 100mW teplota 25C

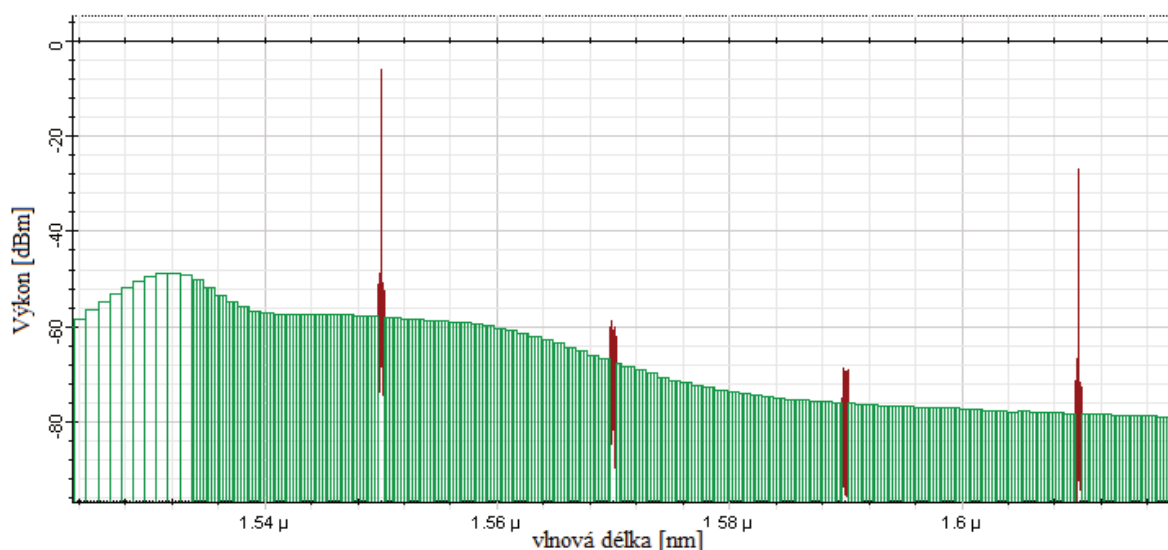


Obrázek 7.11: Výsledek simulace SAE1 Upstream 25C 5km

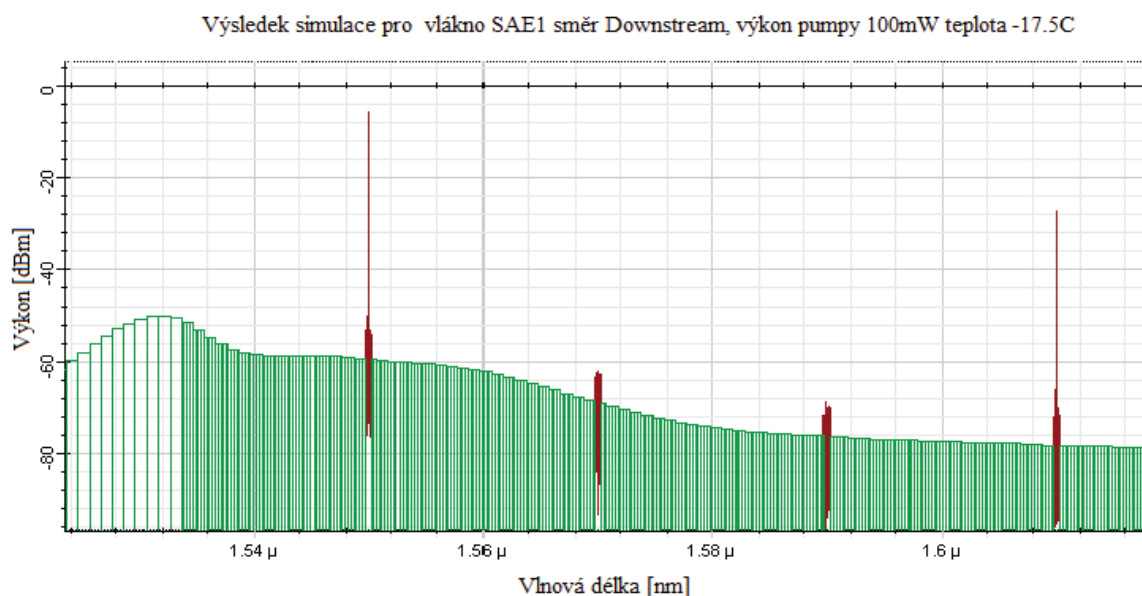
jak je patrné opět se zaměříme na směr downstream. Vstupní kanály 1550 a 1560 musí mít zákonitě nižší výkonovou úroveň než v případě trasy 5km. Tuto skutečnost lze pozorovat na úbytku výkonu pro oba kanály v hodnotě přibližně 8dBm. Upstream kanály se nezmění.

První kanál 1550 byl opět zesílen o hodnotu 22dBm. Druhý kanál 1610nm zůstal nedotčený. Tato situace se opět rozchází s tím jak tomu bylo v reálné situaci, kdy oba dva kanály byly utlumeny. V případě teploty je vidět to, že v případě kanálu 1550nm došlo ke zvýšení hodnoty zesílení. V případě kanálu 1610 naopak se hodnota výkonu snížila. Opět se ovšem nejedná o nijak významný rozdíl. Změny výkonu se pohybují v rozmezí desetin až 1dBm. Výsledek simulace se tedy nijak neshoduje s hodnotou, která byla změřena při reálném experimentálním měření.

Výsledek simulace pro vlákno SAE1 směr Downstream, výkon pumpy 100mW teplota 25C

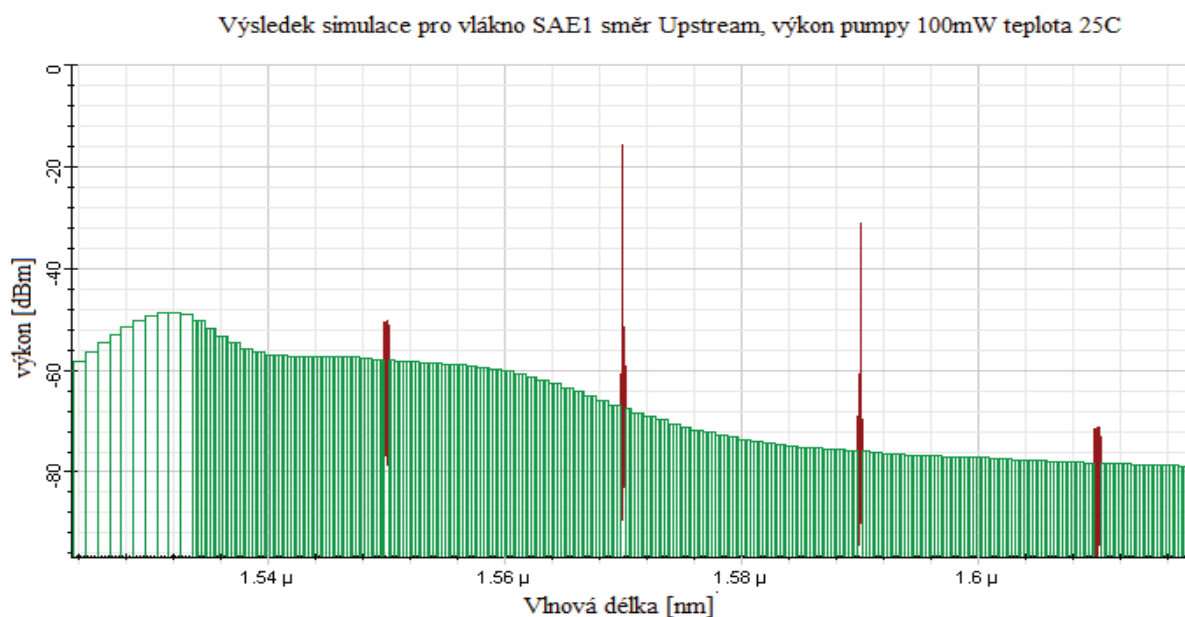


Obrázek 7.12: Výsledek simulace SAE1 downstream 25C 20km

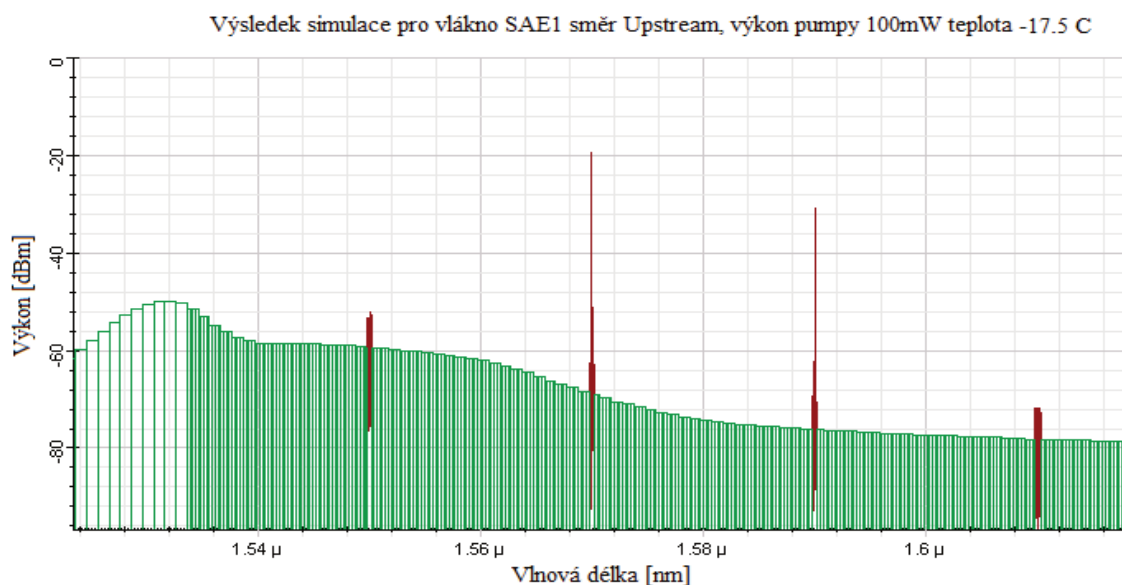


Obrázek 7.13: Výsledek simulace SAE1 downstream -17.5C 20km

Následující obrázky popisují stejnou situaci pro opačný směr. Výsledky simulace ukazují, že naopak kanály downstream a zůstaly nedotčeny a pochopitelně vše se mění v závislosti na upstream kanálech. Zatímco před zesílením měly oba dva kanály hodnotu 1570nm -32dBm a 1590 -39dBm. Na výstupu je zesílen pouze kanál 1570nm na hodnotu -24dBm. Kanál 1590nm je naopak nedotčený. V rámci této simulace se dá konstatovat, že výsledek se podobá alespoň částečně reálnému měření. Ovšem výkonové zesílení z důvodu velké intenzity vstupního signálu nebylo tak velké. Teplota se v tomto případě projevila naopak poklesem výkonové úrovně signálu 1570nm o hodnotu 4dBm. Jedná se o největší zjištěný rozdíl pro toto vlákno v rámci simulace. V reálných podmínkách je situace opět odlišná od výsledku simulace.



Obrázek 7.14: Výsledek simulace SAE1 Upstream 25C 20km

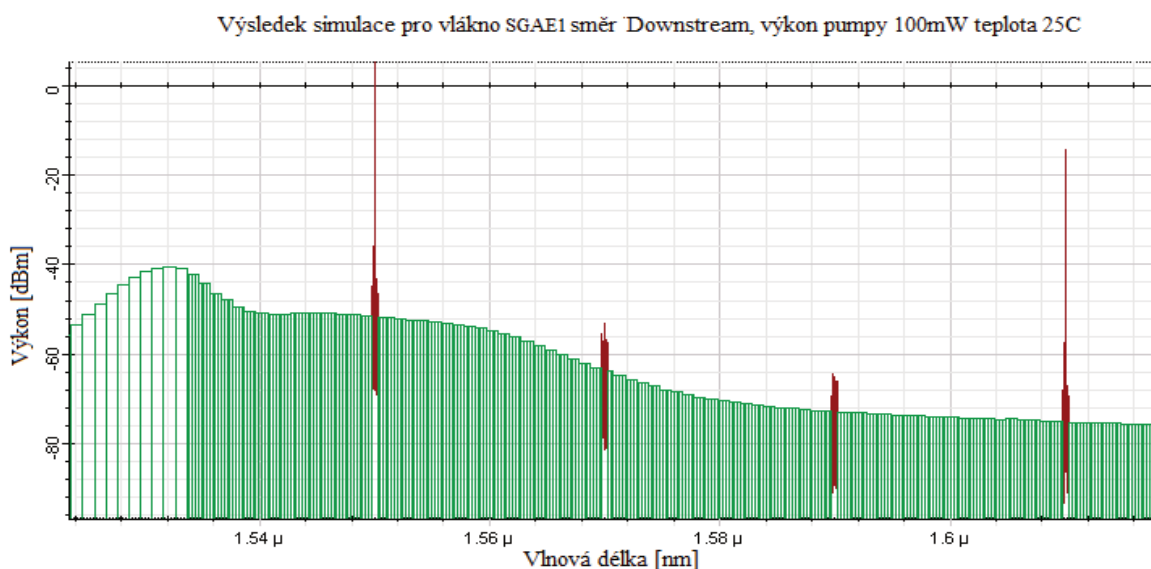


Obrázek 7.15: Výsledek simulace SAE1 Upstream -17.5C 20km

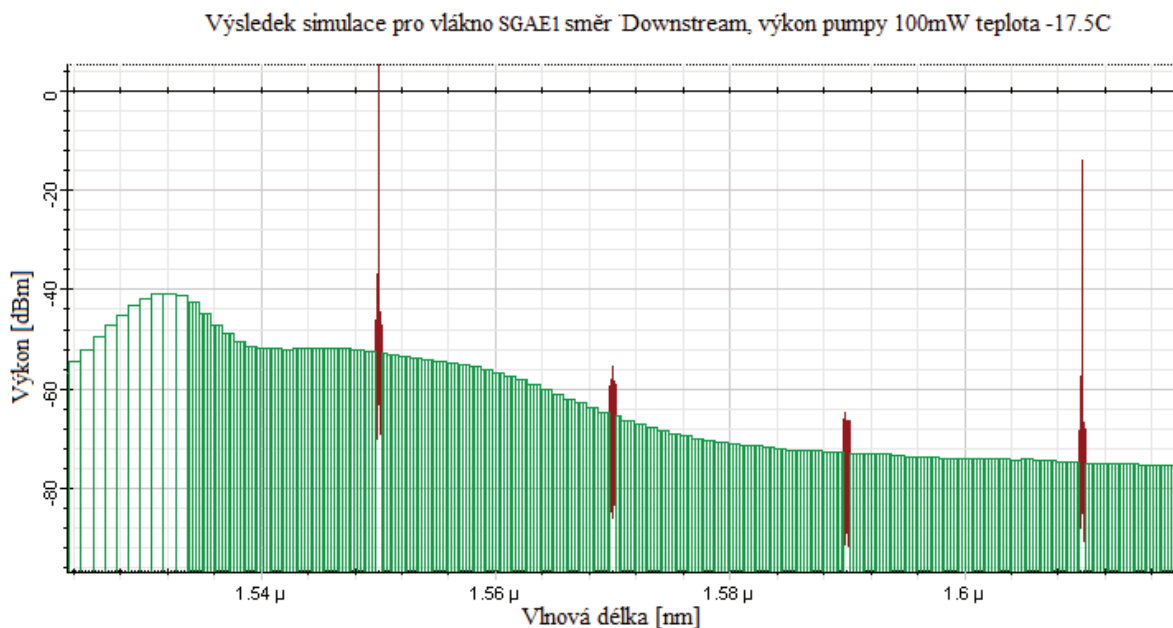
7.3.1 Simulace experimentálního vlákna SGAE-1

Druhým vláknem, které bylo testováno v rámci simulace je vlákno, které ze všech dosahovalo nejlepších vlastností. v rámci simulování bude toto vlákno zesilovat signál jak po uražení 5km, tak po uražení 20km. K tepelnému porovnání budou vybrány opět teploty hraniční 25 a -17.5 stupňů Celsia.

Na obrázcích je patrné, že zesílení v tomto případě dosahuje skutečně vyšších hodnot než jak tomu bylo v případě vlákna SAE1. Nejmarkantnější rozdíl je v případě kanálu 1550nm, kde je zesílení vyšší o 5dBm. Hodnota výkonu je 4dBm. Naopak kanál 1610 zůstal opět nedotčený. V reálné situaci vše jinak. Kanál, který byl zesílen měl hodnotu 1570nm a Naopak kanály 1550nm a 1610nm byly utlumeny. Vliv teploty je opět sotva viditelný, podobně jako v případě vlákna SAE1 je rozdíl do výkonu maximálně 1dBm. Dá se konstatovat, že teplota se nijak významně neprojevila.

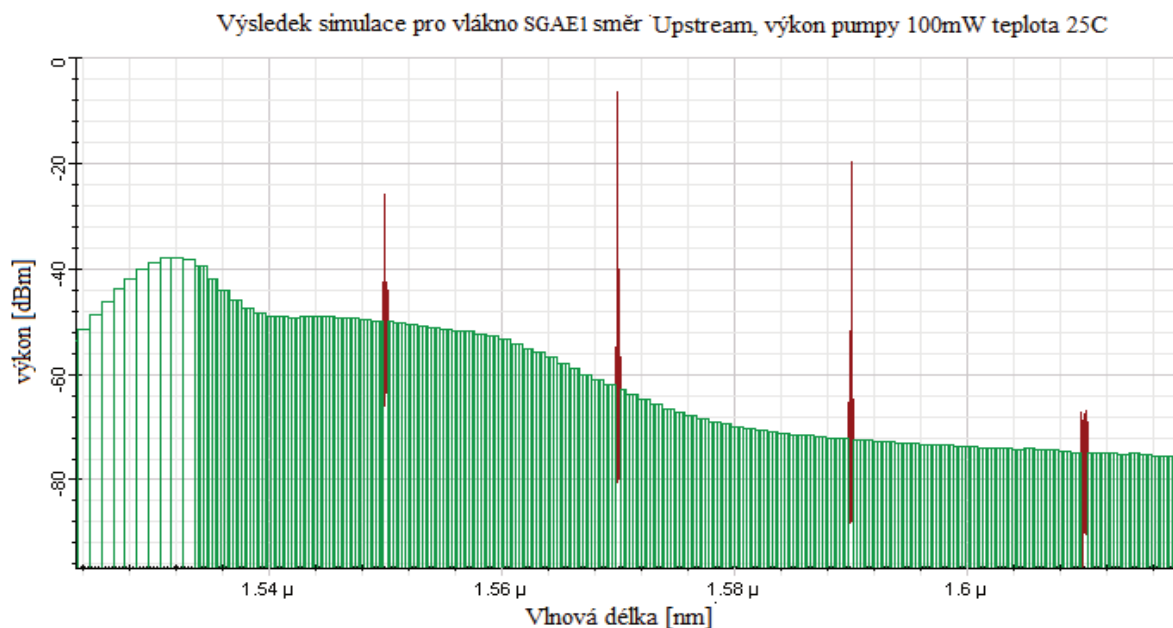


Obrázek 7.16: Výsledek simulace SGAE1 Downstream 25C 5km

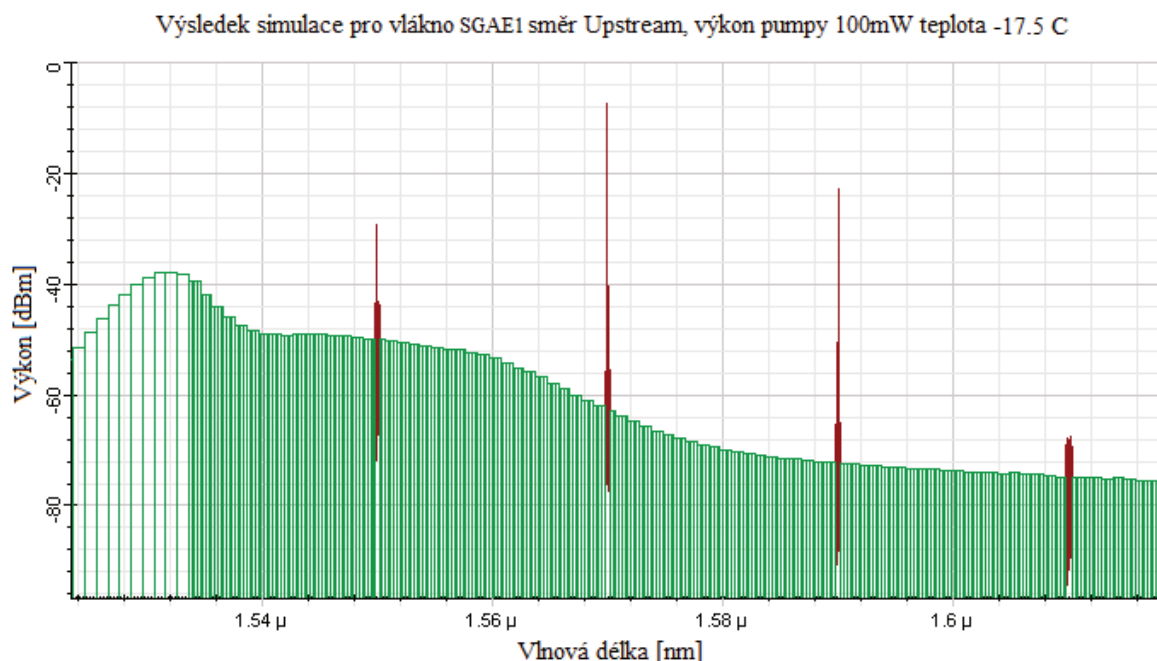


Obrázek 7.17: Výsledek simulace SGAE1 Downstream -17.5C 5km

Následující obrázky ukazují situaci z pohledu Upstream. Jak je vidět, kanály downstream nebyly zesíleny rovnoměrně. Kanál 1610nm zůstal nezměněn. Kanál 1550nm byl zesílen o přibližnou hodnotu 10dBm. Upstream kanály byly zesíleny, 1570nm o 18dBm a 1590nm o 12dBm. Kanál 1610nm byl zesilovačem nedotčen. Při reálném měření byly opět všechny kanály utlumeny, výjimku tvořil pouze kanál 1570nm. V tomto případě se tedy simulace neshoduje s tím, co bylo zjištěno v průběhu reálného měření zesilovacích vláken v síti. Teplotní vliv je opět minimální sotva k vidění. Nižší teplota způsobila pokles výsledné výkonové úrovně upstream kanálů o hodnotu menší než 1dBm. Simulace ovšem potvrdila fakt, že SFP moduly by dokázaly rozpoznat pouze kanál 1570nm a 1590nm.



Obrázek 7.18: Výsledek simulace SGAE1 Upstream 25C 5km

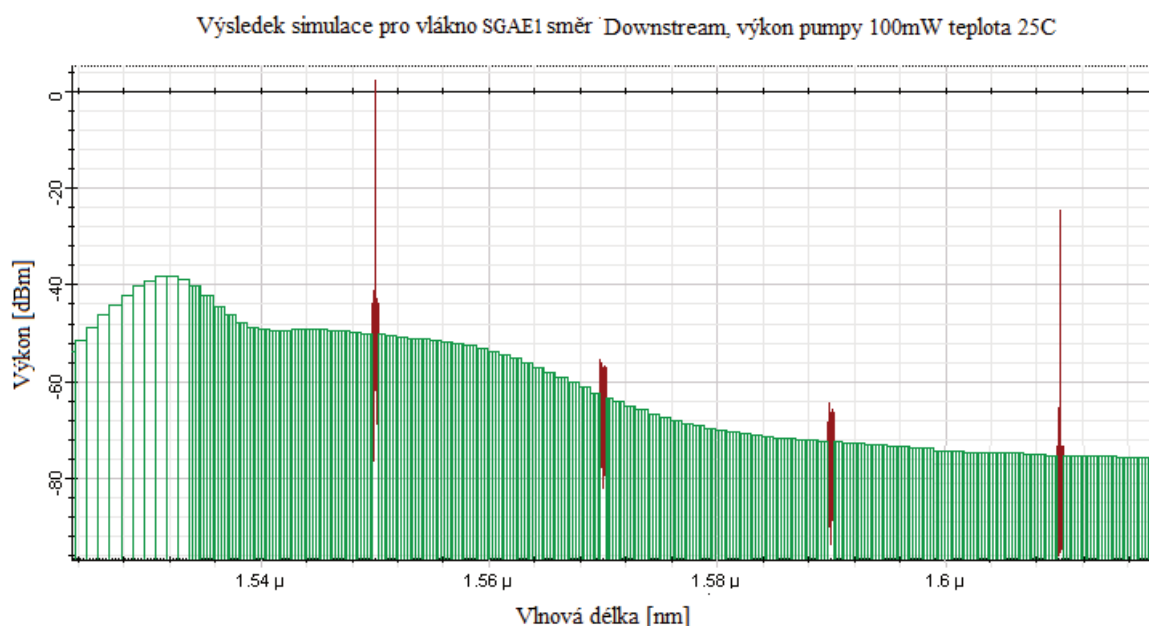


Obrázek 7.19: Výsledek simulace SGAE1 Upstream -17.5C 5km

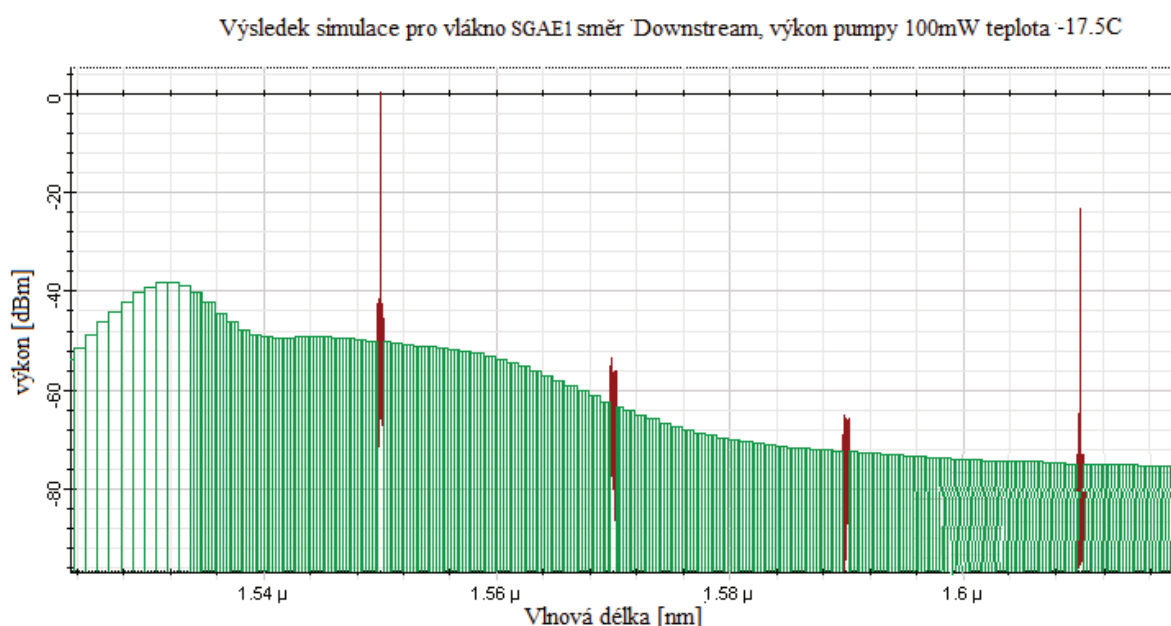
Následovat bude simulace provedená opět pro oba dva směry s tím rozdílem, že byla nasazená delší optická trasa. Očekávání je takové, že se vstupní signály v obou směrech utlumí více, než jak tomu bylo v případě kratší trasy. některé kanály by již neměly být detekovány.

Jak je vidět, kanály 1550nm a 1610nm jsou vlivem nižšího vstupního výkonu na výstupu zesilovacího vlákna na úrovni, která je v případě kanálu 1550nm o 3dBm nižší. V případě kanálu 1610nm došlo k malému zesílení, ovšem tak či onak by nemohl být detekován na straně přijímače. Upstream kanály jsou ve spektru vyobrazeny pouze díky odrazům v síti. Zesilování pro to na ně nemělo žádný vliv. V reálném měření se výkonová úroveň upstream kanálů relativně zachovala v porovnání s downstream kanály. kanál 1570nm byl jediný, který docházel pravidelně k zesílení. Kanál 1690 byl zesílen spíše sporadicky. Downstream kanály byly naopak utlumeny a v některých případech, zejména pak při délce trasy 20km ztraceny v šumu. Simulace se tedy neshoduje s výsledky reálného měření. Zesilovací křivka vlákna se nikterak neshoduje se skutečnou křivkou, protože díky tomu, že vlákno je experimentální, nepodobá se jeho charakteristika klasickému EDF vlákno. V oblasti C pásma toto vlákno má lokální maximum.

Vliv teploty je v tomto případě podobný jako ve všech ostatních. je vidět že zejména kanál 1570nm byl vlivem teploty utlumen. Jedná se o hodnotu desetin až 2dBm. Nejedná se tedy o velký vliv. Tento fakt byl potvrzený v případě experimentálního měření, kdy teplota ovlivnila zesílení pouze minimálně. Dále se pak teplota projevila i posunem v optickém spektru vlnových délek. Tento rozdíl ovšem nebyl nijak viditelný. Z výsledku simulace je vidět, že k posunu ve spektru vlnových délek ovšem nedošlo.



Obrázek 7.20: Výsledek simulace SGAE1 Downstream 25C 20km



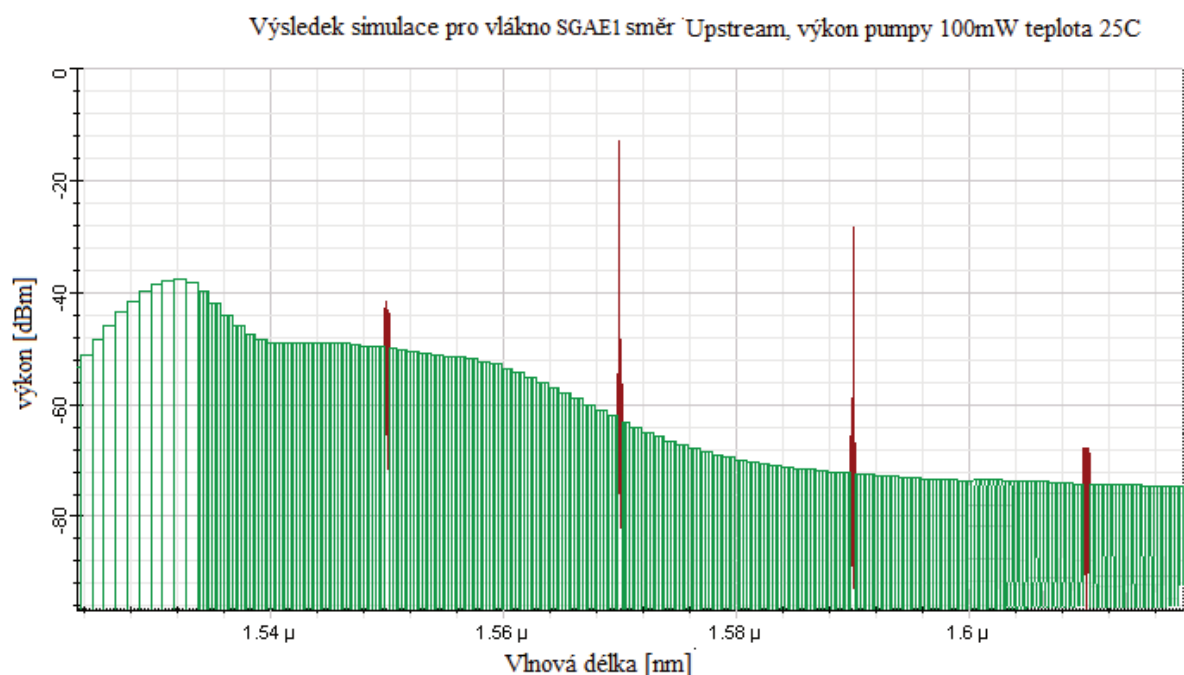
Obrázek 7.21: Výsledek simulace SGAE1 Downstream -17.5C 20km

Následující obrázky ukazují jak se situace vyvíjela v případě směru od účastníků do sítě. Kanály 1570nm a 1590nm budou nyní těmi, které budou posuzovány. Kanály downstream si sice opět ve spektru objeví, na druhou stranu to je vlivem multiplexorů, které způsobují odrazy uvnitř sítě.

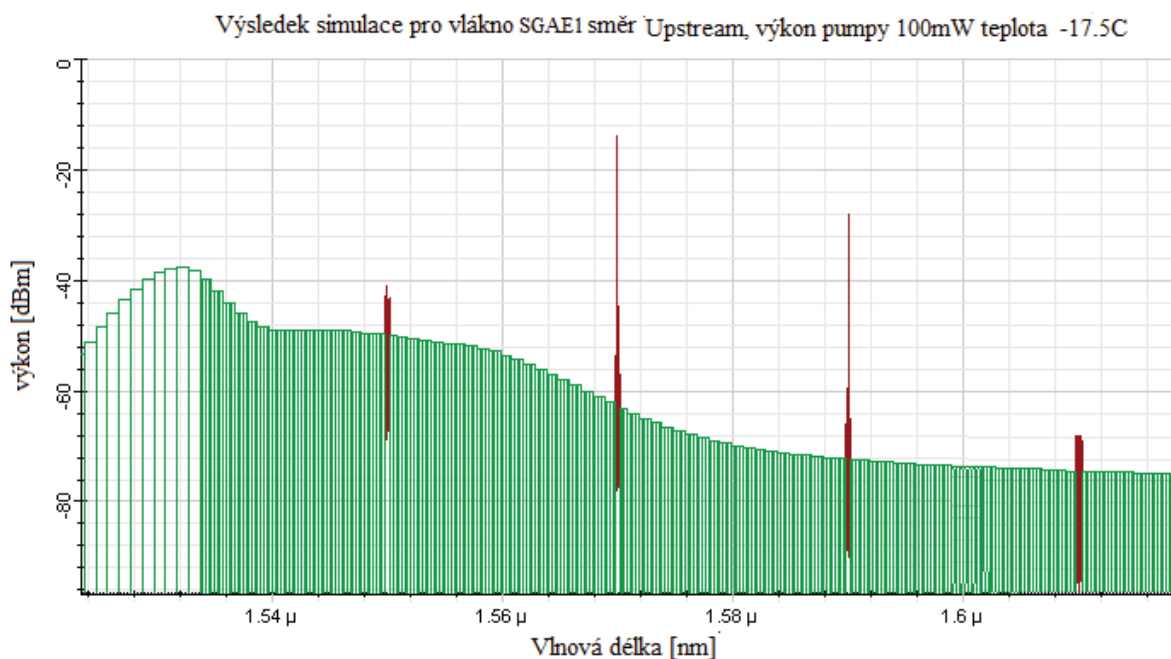
Na obrázcích je vidět, že došlo k zesílení kanálu 1570nm proti vstupnímu signálu z hodnoty -24dBm na hodnotu téměř -12dBm. V případě kanálu 1590nm je zesílení mnohem nižší jedná se o hodnotu 2dBm z -3dBm na -28dBm. Downstream kanály jsou naopak utlumené. V této situaci by SFP moduly dokázaly opět přečíst pouze data přenášená kanálem 1570nm. I přes to že výsledná situace je s reálným měřením v síti podobná, to jakým způsobem zesilovací vlákno ovlivnilo kanály se

ovšem liší. Kanál 1610nm byl naprosto pohlčen okolním šumem a nebylo jej možné detekovat ani spektrálním analyzátozem.

Teplotní vliv v případě simulace je podobný jako doposud. Nižší teplota způsobila pokles výkonu signálu 1570nm o hodnotu desetín až 1dBm. V případě ostatních kanálů se ale neprojevila a jejich hodnota zůstala zachována. V reálném měření sice nešlo o větší rozdíly než jak tomu je v případě kanálu 1570nm, nicméně byly viditelné i pro ostatní kanály.



Obrázek 7.22: Výsledek simulace SGAE1 Upstream 25C 20km



Obrázek 7.23: Výsledek simulace SGAE1 Upstream -17.5C 20km

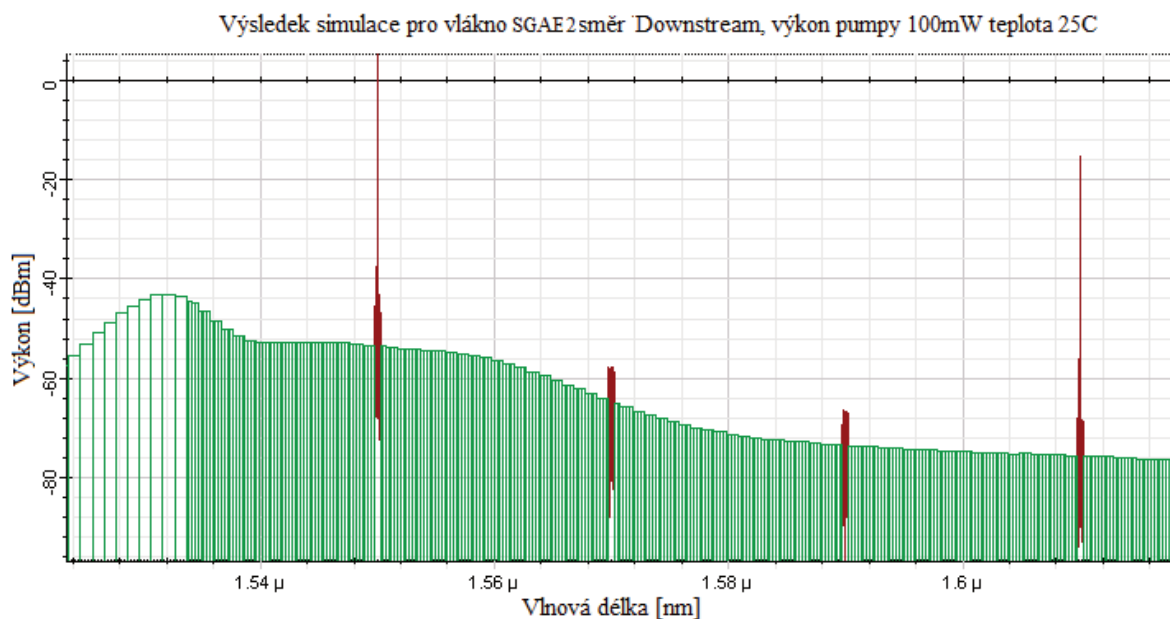
7.3.2 Simulace experimentálního vlákna SGAE-2

Posledním simulovaným vláknem je vlákno SGAE2, jeho parametry a materiálové vlastnosti jsou velmi blízké vlastnostem vlákna SGAE1. Rozdíl je ovšem v množství dopování erbových iontů, kterých je v tomto případě méně. Díky tomu, by toto vlákno mělo dosahovat menší hodnoty zesílení, než jak je tomu v případě SGAE1.

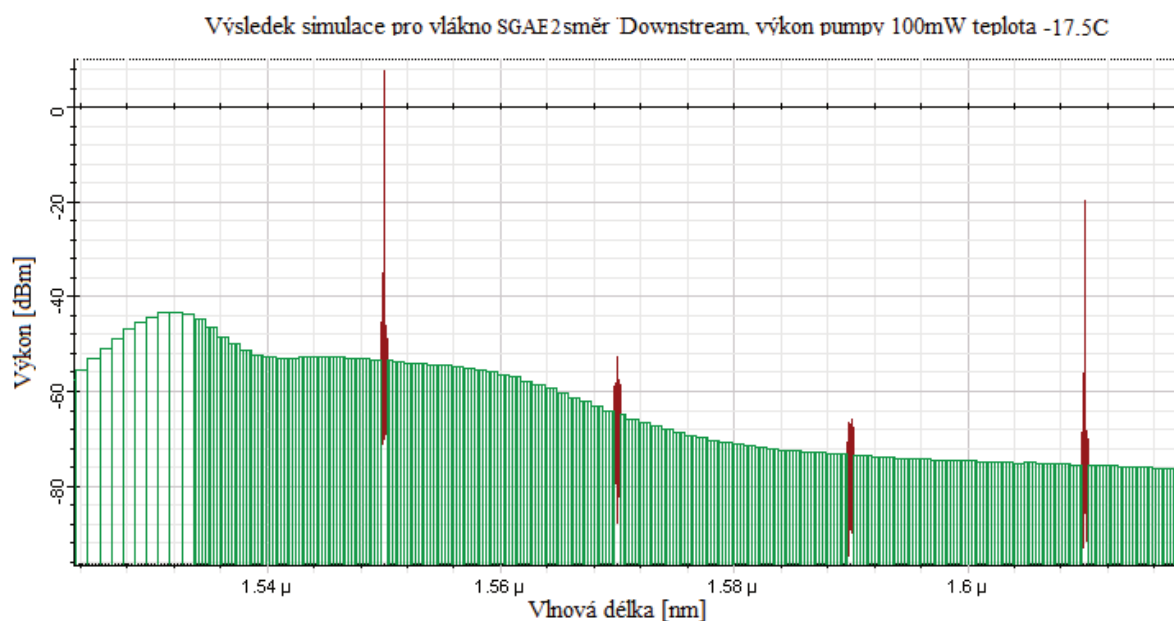
Následující obrázek ukazuje směr downstream tedy od sítě účastníků, pro délku trasy pět kilometrů, k vidění je srovnání opět obou hraničních teplot, pro které bylo provedeno i experimentální měření.

Jak je vidět na obrázcích situace je velmi podobná vlákno SGAE1. Kanál 1550nm byl zesílen na hodnotu 5dBm. Zesílení má tedy hodnotu 29dBm. Upstreamové kanály jsou daleko pod hranicí citlivosti detektoru pro SFP moduly. Kanál 1610nm je na výkonové úrovni -16dBm a byl tedy zesílen o 8dBm. Komunikace by tedy ve směru downstream proběhla a kanály účastníci by v síti komunikovat dokázali.

Při pohledu na spektrum vyobrazující chování vlákna při teplotě -17.5 stupňů je vidět, že zesílení v případě kanálu 1550nm je opět nižší a teplota tedy v případě simulace výsledný výkon snižuje. Vliv ovšem není markantní a komunikace ve směru downstream by byla zachována. Výsledek simulace se ani v tomto případě neshoduje s reálnými výsledky provedenými při měření na CWDM optické pasivní síti., to je především způsobeno vlivem, že simulační podmínky nedokážou vyčíslit variaci všech reálných působících vlivů, které se projeví v průběhu měření.



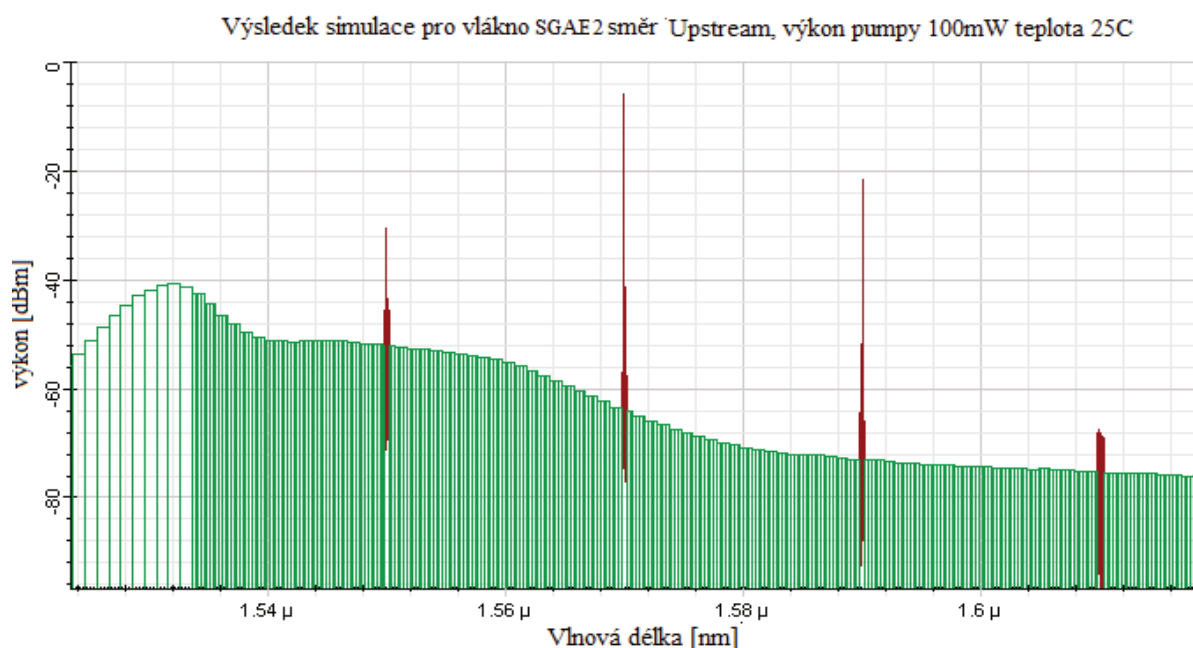
Obrázek 7.24: Výsledek simulace SGAE2 Downstream 25C 5km



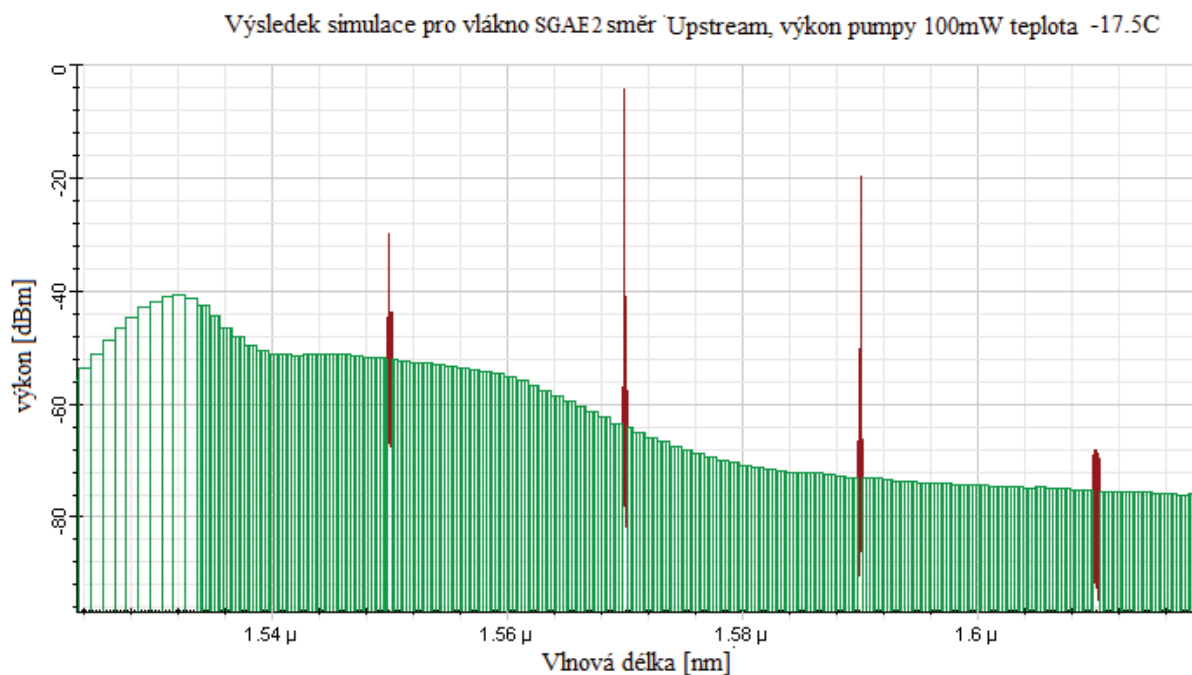
Obrázek 7.25: Výsledek simulace SGAE2 Downstream -17.5C 5km

Následující obrázky znázorňují chování vlákna ve směru od účastníků do optické sítě. Zde je vidět, že tentokrát došlo k zesílení kanálů 1570nm a 1590nm. Oba by byly v takovéto situaci detekovány na konci optické trasy detektorem. Vliv teploty v tomto případě je odlišný a způsobuje naopak výkonový nárůst. I přes to, že se nejedná o větší rozdíl, než jak tomu bylo doposud, zajímavé je to, že se projevuje jak poklesem na přírůstkem. Toto chování v průběhu experimentálního měření nebylo pozorováno.

Výsledek simulace se tedy neshoduje s reálným měřením stejně tak jako tomu bylo u ostatních vláken. Příčinou je rozdíl mezi matematickými výpočty a reálnými podmínkami.



Obrázek 7.26: Výsledek simulace SGAE2 Upstream 25C 5km

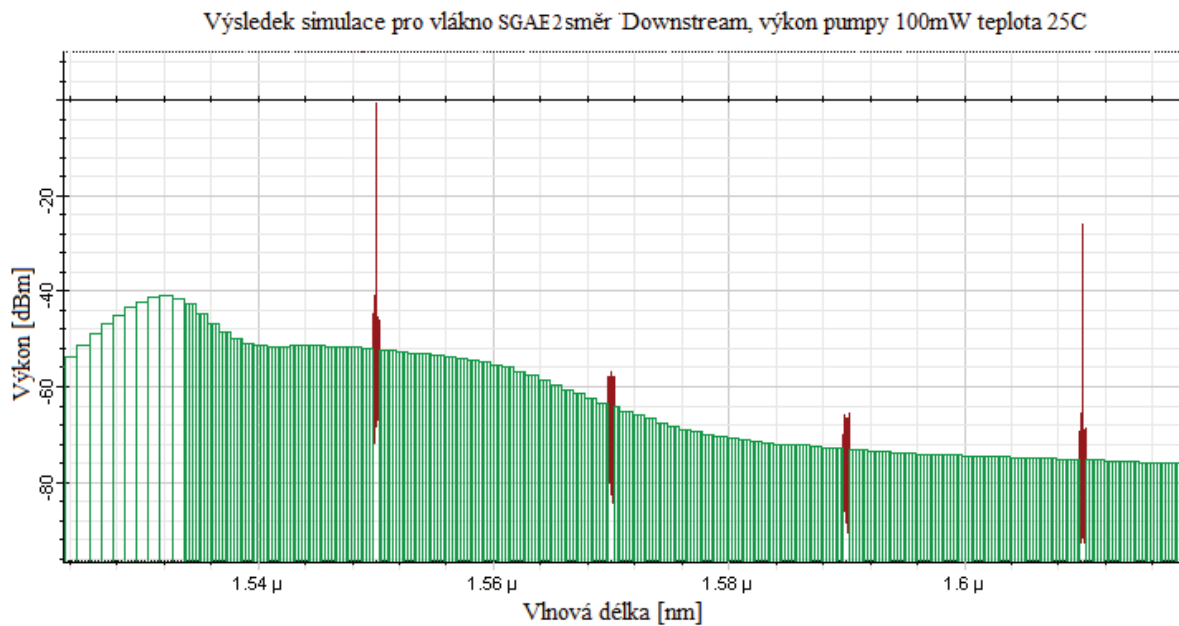


Obrázek 7.27: Výsledek simulace SGAE2 Upstream -17.5C 5km

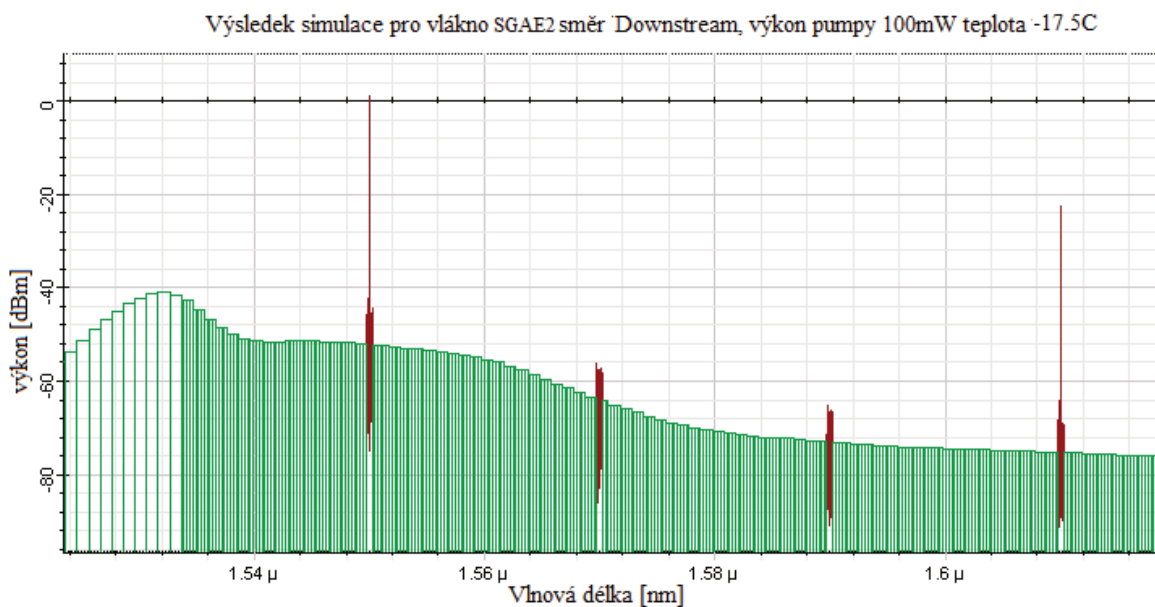
Další obrázky ukazují chování experimentálního vlákna podobně jak tomu bylo doposud s tím, že trasa 5km bude nahrazena za delší trasu 20km. očekáváním je opět pokles vstupního signálu na základě čehož by měl výstupní signál z EDF experimentálního vlákna mít také menší výkonovou úroveň. V případě reálného měření v tomto okamžiku zejména byly downstream kanály převážně pohlceny okolním šumem a nebylo je možné rozeznat ve spektru, natož detekovat.

Výsledek simulace ukazuje, že došlo skutečně k poklesu výstupního výkonu pro oba downstream kanály. Hodnota výkonu v případě kanálu 1550nm je 0dBm. Ovšem v případě kanálu 1610nm je tato hodnota -26dBm, což je za hranicí možností detektoru na straně přijímače. Skrze síť by tedy prošel pouze kanál 1550nm. Při pohledu na vliv teploty je opět vidět to, že nižší teplota způsobila malý nárůst výkonové úrovně v případě kanálu 1550nm, naopak pro kanál 160nm výkon klesl. Rozdíl je pořád v jednotkách desetín až 2dBm. Při reálném měření byl ovšem kanál 1610nm zcela utlumený a zesílení kanálu 1550nm nikdy nedosáhlo úrovně 0dBm.

Lze tedy konstatovat zřejmý fakt, že simulace se nikterak neshoduje s reálnými hodnotami, které byly naměřeny v průběhu druhého experimentálního měření pro nasazení EDF testovaných vláken na optickou pasivní síť s hrubým vlnovým multiplexem.



Obrázek 7.28: Výsledek simulace SGAE2 Downstream 25C 20km



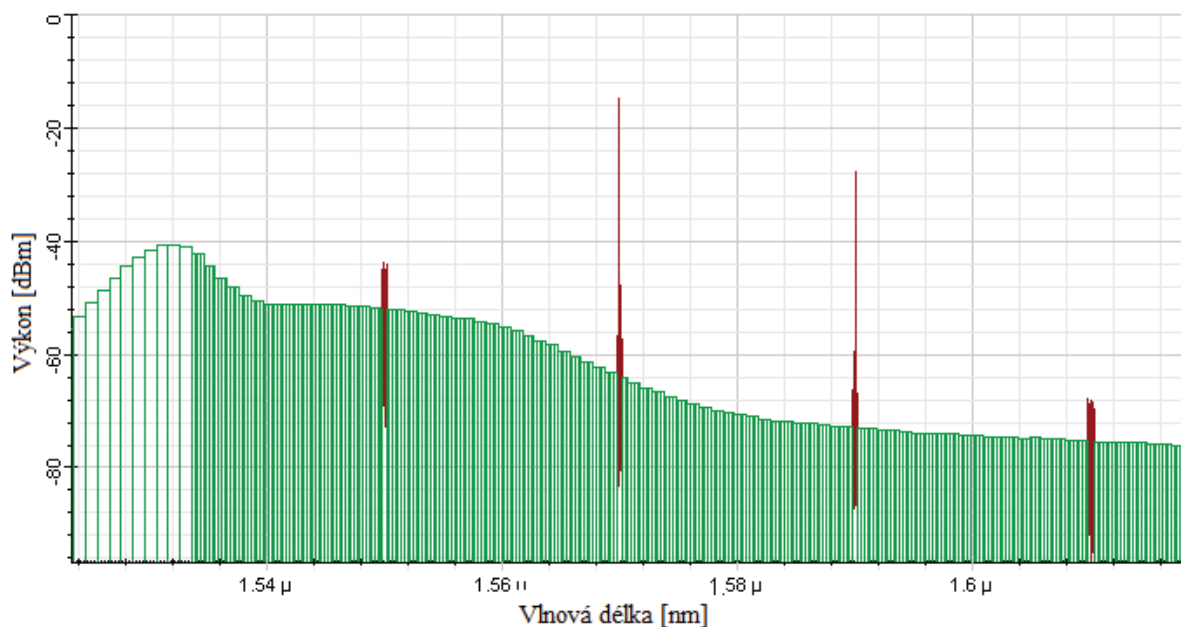
Obrázek 7.29: Výsledek simulace SGAE2 Downstream -17.5C 20km

Následující dva obrázky ukazují jakým výsledkem simulace v případě komunikace ve směru od účastníků do sítě. V tomto případě je výsledek zesílení o 12dBm menší, než tomu bylo v případě kratší optické trasy. Kanál 1570nm se nyní pohybuje na výkonové úrovni -16dBm a kanál 1590 -28dBm. Při trase 20km by byl přijímačem detekován pouze jeden kanál 1570nm. Druhý upstream kanál by byl pohlcen sítí. Tento výsledek je obdobný v případě všech experimentálních vláken.

Vliv teploty na výkonovou charakteristiku se v případě výsledků simulace tohoto vlákna opět neprojevil nijak významnou mírou. Kanál 1570nm dosáhl o přibližně 1.5dBm vyšší hodnoty, než jak tomu bylo v případě nižší vyšší teploty. Kanál 1590nm byl naopak přibližně o hodnotu 1dBm utlumený.

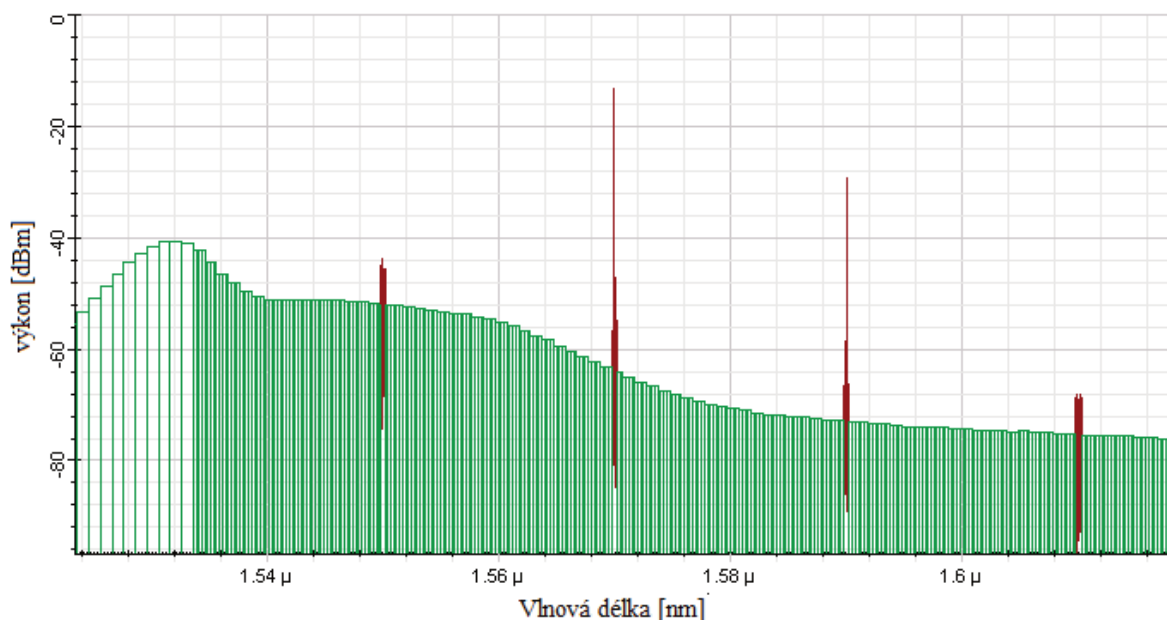
Výsledky simulace v programovém prostředí Optiwave se neshodují s reálnými měřeními provedenými na školní síti v učebně EB315. Za účelem dosažení větší shody by bylo potřeba mít větší množství informací o experimentálních vláknech. Tím by se dalo dosáhnout lepších a shodnějších výsledků.

Výsledek simulace pro vlákno SGAE2 směr Upstream, výkon pumpy 100mW teplota 25C



Obrázek 7.30: Výsledek simulace SGAE2 Upstream 25C 20km

Výsledek simulace pro vlákno SGAE2 směr Upstream, výkon pumpy 100mW teplota -17.5C



Obrázek 7.31: Výsledek simulace SGAE2 Upstream -17.5C 20km

Závěr

Úkolem této diplomové práce bylo zjistit, jakým způsobem se projevuje teplotní zatížení experimentálních Erbiem dopovaných optických zesilovacích vláken dodaných výzkumným centrem sídlícím v Indii v Kalkatě. K tomuto účelu bylo potřeba modifikovat již sestavené měřicí pracoviště, což zahrnovalo výzvu vypořádat se s variací technických problémů, které stály v cestě. Dále bylo nutné pomocí modifikovaného měřicího pracoviště provést experimentální měření na jehož základě bylo možné posoudit teplotní vliv. Cílem bylo také zjistit, jak se vlákna chovají při postupném buzení, což bylo provedeno postupným zvyšováním výkonové úrovně laseru, který dodává zesilovacím vláknům energii k zesílení ve formě světla. Následně byly vlákna tetována při nasazení v reálné optické síti CWDM. Výsledky měření byly porovnány s výsledky simulace, která představuje matematicko-fyzikální pozadí na základě kterého je vliv teploty predikován. Cílem tedy bylo posoudit, zda se vlákna chovají dle očekávání, či nikoliv.

V první kapitole byly popsány xWDM optické sítě, jejich princip funkce, dělení, typ multiplexu a důvod, proč jsou pro tyto sítě optické zesilovače tak důležité. Úkolem každé sítě je spojit co nejvíce účastníků. Aby bylo možné tohoto dosáhnout v případě optických sítí, které vzhledem k jejich možnostem představují budoucnost, je nutností aby dokázaly přenášet signál často na velkou vzdálenost. Vlivem parazitních jevů je ovšem signál jdoucí v síti utlumen a je potřeba obnovit jeho amplitudu. Optické zesilovače představují řešení, které umožnilo sítím tohoto typu dosáhnout velkého technologického pokroku.

V další kapitole jsou proto popsány optické zesilovače. Jejich základní dělení, princip obnovy signálu, princip funkce, základní parametry a způsob zapojení do sítě. Na tuto kapitolu navazuje třetí kapitola, ve které jsou rozebrány jednotlivé typy optických zesilovačů, vzájemné rozdíly, výhody a nevýhody a možnosti, které nabízí. V této části se práce zaměřuje právě na Erbiem dopované optické vláknové zesilovače, které ze všech ostatních typů jsou nejvýznamnější. V textu je podrobně popsán princip na jakém pracují, způsob jakým dochází k zesílení vstupního signálu na úrovni kvant. Tyto zesilovače pracují na principu stimulované emise a využívají energetických úrovní, které představují oběžné dráhy elektronů kolem jader Erbiových atomů. Veškeré tyto principy musely být v práci zpracovány za účelem porozumění jak zesilovače pracují.

Následující kapitoly obsahují popis měřicího pracoviště, zařízení a komponent, které bylo nutno využít za účelem experimentálního měření. Nejdříve bylo nutno vyřešit způsob, jakým budou vlákna podchlazována. Původní myšlenka, že budou využity Peltiérové články, které pracují na principu polovodičových můstků a vlivem průchodu elektrické energie se na jedné ze svých plochých stran zahřívají a na druhé ochlazují, byla nahrazena. Polovodičové můstky Peltierových článků jednak nedokážou odolat kondenzaci vodní páry vlivem vysokého rozdílu teplot na malé ploše. Tento problém by vyřešen nasazením článků, které mají můstky izolované silikonem. Jelikož se ovšem k straně, která se zahřívá přidává i teplo vzniklé příkonem, dosahuje tato strana vysokých teplot, které v kombinaci s pasivním chladičem vytvářely efekt fěnu. Tento jev je kontraproduktivní, protože energie ve formě tepla převyšuje energii ve formě chladu a po překonání hranice napájení článků 4 ampér dojde k opětovnému ohřívání vláken a to i přes to, že byla vyrobena polystyrenová izolační čepice, které měla za úkol oddělit ochlazenou část od okolního prostředí.

Další možností by bylo na ohřívanou stranu Peltierových článků nasadit bloky vodního chlazení, které pomocí vody, jež má lepší tepelnou vodivost než vzduch odvádět teplo pryč z místa, kde se nachází ochlazovaná vlákna a tím zachovat původní sestavené pracoviště a umožnit tak se stejným aparátem vlákna jak podchlazovat, tak v případě otočení polarity článků ohřívat. Toto testování by mohlo být cílem další diplomové práce.

Tento technický problém byl následně vyřešen pomocí modifikovaného mrazicího přístroje. Jedná se o běžný mrazicí přístroj, kterému byl dodán výkonnější kompresor, byly vyměněny elektrické rozvody a instalován termostat s digitálním displejem a uživatelským rozhraním představující tři tlačítka, pomocí kterých se dá termostat nastavovat.

Prvním experimentálním měřením bylo testování zesílení vstupního širokospektrálního signálu v C a L pásmu optických délek. Toto měření ukázalo, jak se mění výkonová charakteristika v průběhu buzení vláken nastavováním výkonové úrovně dopovacího laseru svítícího na vlnové délce 980nm. Toto měření ukázalo, že v průběhu buzení vláken je ze všech nejlepší vlákno s označením SGAE1. Důvodem je, že má nejmenší vložný útlum pro oblast vlnových délek 1530nm, který má hodnotu 10dB na metr. dalším zajímavým jevem v případě obecně obou vláken označených jako SGAE je vznik lokálního maxima v rozsahu vlnových délek od 1530 do 1540 nanometrů. Nejhorším vláknem naopak v průběhu buzení bylo vlákno SAE1. Toto vlákno má naopak nejvyšší hodnotu vložného útlumu, to jest 20dB na metr v okolí 1530nm. Na druhou stranu toto vlákno má největší počet erbiových iontů dopovaných v průběhu výroby do vlákna. Přesná hodnota je $18777 \times 10^{16} \text{ Er}^{3+}/\text{cc}$. Díky tomu toto vlákno po dostatečném vybudování dosahovalo nejvyšší hodnoty zesílení.

Teplotní vliv byl nejlépe pozorován právě v případě tohoto měření. Všechna vlákna vykazovala v průběhu změny teploty podobné chování. Čím nižší teplota na ně působila, tím menší hodnotu výkonové úrovně dosahovaly v rozpětí vlnových délek 1530-1545nm. Globální maximum bylo posunuto několik nanometrů směrem k C pásmu. V porovnání s nižšími teplotami následoval prudký pokles výkonu v L pásmu a vznik dalšího lokálního maxima v oblasti vlnových délek 1580-1600nm. Pak ovšem následoval strmý pokles výkonu ve výkonové charakteristice v porovnání s vyššími teplotami.

Druhé experimentální měření představovalo testování vláken v CWDM optické síti. K tomuto účelu bylo nejdříve nutno sestavit takovou síť a provést úvodní náměry, jako je zjištění hodnot útlumu pro jednotlivé trasy, chromatické disperze a pulzní vidové disperze. Síť byla sestavena celkem ze 4 kanálů, kdy dva byly ve směru upstream a další dva downstream. Následovalo testování s nasazením optického zesilovače, měnila se délka optické trasy, výkon pumpy a teplota zesilovače.

Výsledkem tohoto měření bylo, že ze všech tří kanálů došlo k zesílení pouze jednoho jediného, šířícího se na vlnové délce 1570nm. Druhý kanál 1590nm byl zesílen sporadicky. Zbylé dva kanály 1550nm a 1610nm byly téměř vždy pohlceny šumem. V průběhu tohoto měření bylo nemožné sledovat vliv teploty. Jednak protože bylo velmi obtížné jej zjistit a jednak proto, že samotná síť obsahující kanály tvořené signálem vysílaným SFP moduly vykazovala kolísání výkonové úrovně jednotlivých kanálů. To je způsobeno tolerancí výkonové úrovně SFP modulů a pak také tím že CWDM síť na rozdíl od DWDM sítě nedisponuje tak přesnými optickými zdroji. Není to ani žádoucí.

Poslední částí bylo simulovat chování zesilovacích vláken v CWDM síti. Simulace byla provedena v programovém prostředí Optiwave OptiSystem, které vychází z matematických modelů a predikcí. Bohužel výsledky simulace neprokázaly shodu s reálným měřením. To je způsobeno tím, že

simulace jednak není schopná počítat s reálnými proměnlivými vlivy, které působí v reálném měření. Déle pak také proto, že k provedení simulace je potřeba u všech prvků v síti nastavit správné parametry, které je velmi obtížné zjistit, protože mnozí výrobci si chrání svá tajemství a kromě katalogových parametrů neposkytují žádné doplňující informace. Z tohoto důvodu je simulaci nutno chápat pouze jako doplňující řešení, které doprovází reálné experimentální řešení.

Pro budoucí testování by bylo zajímavé vyzkoušet vliv záporných teplot v síti DWDM, kde by bylo možné jej lépe sledovat. Dále pak by mohlo být zajímavé provést měření s nasazením Peltierových článků s použitím vodního chlazení, čímž by se měřicí pracoviště stalo univerzálním. zajímavé by také mohlo být testovat experimentální vlákna v tahu a zjišťovat jak se takový typ zatížení projeví ve výkonovém spektru.

Použitá literatura

- [1] Wavelength-division-multiplexed passive optical network (WDM-PON) technologies for broadband access: a review [Invited]. Pdfs.semanticscholar.org [online]. 2005 Optical Society of America: Amitabha Banerjee, 2005 [cit. 2017-02-19]. Dostupné z: <https://pdfs.semanticscholar.org/8612/6dc71bc82efaff71a2e03b07d4a267b31d5d.pdf>
- [2] Optoelektronika. Optoelektronika Ing. Lukáš Bubník, Ing. Jiří Klajbl, Ing. Petr Mazuch: ISBN: 978-80-88058-20-5, vydáno 30. 4. 2015 [online]. USA, New York, Forest Home: Cornell University, 2008;[162str] [cit. 2017-02-19]. Dostupné z: <https://publi.cz/books/185/11.html>
- [3] Prvky v PON: Pasivní optické přístupové sítě [online]. Ostrava: Ing. Petr Koudelka, Ing. Jan Látal, Ing. Petr Šiška, Ph.D., 2011 [cit. 2017-02-19]. Dostupné z: <https://www.dropbox.com/sh/0fya1o4zxvvnlwz/AAARkqrScrxAVGgTk4HlisRna/Vlaknova?dl=0&preview=Prvky+v+PON.pdf>
- [4] HAVLIŠ, Bc. Ondřej a Ing. Petr MÜNSTER. Pasivní optické sítě WDM-PON: VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ [online]. Brno, 2012, , 125 [cit. 2017-02-19]. Dostupné z: <https://dspace.vutbr.cz/bitstream/handle/11012/8981/Pasivn%C3%AD%20optick%C3%A9%20s%C3%ADt%C4%9B%20WDM-PON.pdf?sequence=2>
- [5] FTTx Přístupové infrastruktury. : MIROSLAV HLADKÝ [online]. Brno: Vysoké učení technické, 2008 [cit. 2017-02-19]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=6463
- [6] Návrh a správa WDM systémů pro optické sítě. : VLADIMÍR ČERVENKA [online]. Brno: Vysoké učení technické, 2010 [cit. 2017-02-19]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=26688
- [7] Návrh a správa WDM systémů pro optické sítě. Pasivní optické sítě WDM-PON: P. Lafata [online]. Praha: České vysoké učení technické, 2009 [cit. 2017-02-19]. Dostupné z: <http://access.feld.cvut.cz/rservice.php?akce=tisk&cislocclanku=2009050004>
- [8] Návrh sítě WDM-PON. Návrh sítě WDM-PON: Jan Láška [online , ID 105590]. Brno: Vysoké učení technické, 2012;[100str] [cit. 2017-02-19]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=52621
- [9] Optické zesilovače. Optické zesilovače: Zbyněk Mlejnek [online]. Brno: Vysoké učení technické, 2008;[46str] [cit. 2017-02-19]. Dostupné z: https://dspace.vutbr.cz/bitstream/handle/11012/3632/Bakalarska_prace_77660.pdf?sequence=1
- [10] Optické zesilovače. Optické zesilovače: Michal Lucki [online]. Praha: České vysoké učení technické, 2009;[56str] [cit. 2017-02-19]. Dostupné z: http://data.cedupoint.cz/oppa_e-learning/2_KME/162.pdf
- [11] Optické zesilovače pro metropolitní a přístupové sítě. Optické zesilovače pro metropolitní a přístupové sítě: MARTIN ČECH [online, ID 78023]. Brno: Vysoké učení technické, 2011;[70str] [cit. 2017-02-19]. Dostupné z: <https://core.ac.uk/download/pdf/30297927.pdf>

- [12] Zesilovače EDFA podrobně. Zesilovače EDFA podrobně: EDFA 2 [online]. Ostrava: Vysoká škola Báňská Technická univerzita, 2012;[27str] [cit. 2017-02-19]. Dostupné z: <https://www.dropbox.com/sh/0fya1o4zxvvnlwz/AACMiPvpRVgIPpQilwm5W8vMa/Vlaknova/Jakub%20Kolar-Jan%20Wasseubauer-Miroslav%20Vecera?dl=0&preview=Zesilova%C4%8De+EDFA+v2+podrobn%C4%9B.pdf>
- [13] Polovodičové zesilovače optického signálu pre plne transparentné optické siete. Polovodičové zesilovače optického signálu pre plne transparentné optické siete: EDFA 2 [online]. Žilina: Žilinská univerzita, 2008;[68str] [cit. 2017-02-19]. Dostupné z: <https://www.dropbox.com/sh/0fya1o4zxvvnlwz/AACMiPvpRVgIPpQilwm5W8vMa/Vlaknova/Jakub%20Kolar-Jan%20Wasseubauer-Miroslav%20Vecera?dl=0&preview=2529.pdf>
- [14] Raman amplification in optical communication systems: Rasmus Kjær. Raman amplification in optical communication systems: Rasmus Kjær [online]. Denmark: Technical University, 2008;[162str] [cit. 2017-02-19]. Dostupné z: <https://www.dropbox.com/sh/0fya1o4zxvvnlwz/AADnzm3cQBLLeE5-wAsiAt3gxa/Vlaknova/Zesilovace%20obecne?dl=0&preview=Rasmus+Kj%C3%A6r.pdf>
- [15] Semiconductor Optical Amplifiers: Rasmus Kjær. Semiconductor Optical Amplifiers: Farhan Rana [online]. USA, New York, Forest Home: Cornell University, 2008;[162str] [cit. 2017-02-19]. Dostupné z: <https://www.dropbox.com/sh/0fya1o4zxvvnlwz/AADnzm3cQBLLeE5-wAsiAt3gxa/Vlaknova/Zesilovace%20obecne?dl=0&preview=Rasmus+Kj%C3%A6r.pdf>
- [16] BECKER, P.C., N.A. OLSSON a J.R. SIMPSON. Erbium Doped fiber Amplifiers: Fundamentals and technology. San Diego, London: Academic Press, 1999. ISBN 0-12-084590-3, 0-12-084590-3.
- [17] J. F. DIGONNET, Michel, ed. Rare-Earth-Doped fiber Lasers and Amplifiers. Second edition. Stanford University California: Marcel Dekker, Inc New York • Basel, 2001. ISBN 0-8247-0458-4.
- [18] Temperature Effect on the Emission CrossSection of Er in AlO Fiber Amplifier: Osama Mahran , Mohammed Salah Helmy and Mourad Abd El Hai [online]. Alexandria Egypt: Faculty of Science , University of Alexandria, 2009 [cit. 2017-02-19]. Dostupné z: <https://www.dropbox.com/sh/0fya1o4zxvvnlwz/AADesgyX3iUysMAdmq8ZeSaOa/Vlaknova/Jakub%20Kolar-Jan%20Wasseubauer-Miroslav%20Vecera/Clanky%20vziv%20teploty%20na%20EDF?dl=0&preview=1692-1697.pdf>
- [19] Model of Temperature Dependence for Gain Shape of Erbium-Doped Fiber Amplifier: Maxim Bolshtyansky, Paul Wysocki, and Nicholas Conti [online]. 0733–8724/00\$10.00 © 2000 IEEE: JOURNAL OF LIGHTWAVE TECHNOLOGY, 2000 [cit. 2017-02-19]. Dostupné z: <https://www.dropbox.com/sh/0fya1o4zxvvnlwz/AADesgyX3iUysMAdmq8ZeSaOa/Vlaknova/Jakub%20Kolar-Jan%20Wasseubauer-Miroslav%20Vecera/Clanky%20vziv%20teploty%20na%20EDF?dl=0&preview=00896214.pdf>
- [20] Simple modeling approach for the temperature dependence of the gain of erbium-doped fiber amplifiers: Paul F. ' , Nicholas Conti [online]. Boston, Massachusetts: JOURNAL OF LIGHTWAVE TECHNOLOGY, 2000 [cit. 2017-02-19]. Dostupné z: <https://www.dropbox.com/sh/0fya1o4zxvvnlwz/AADesgyX3iUysMAdmq8ZeSaOa/Vlaknova/Ja>

kub%20Kolar-Jan%20Wasseubauer-Miroslav%20Vecera/Clanky%20vliv%20teploty%20na%20EDF?dl=0&preview=wysocki1999.pdf

- [21] Optical Engineering - Review on recent developments in hybrid optical amplifier for dense wavelength division multiplexed system: Simranjit Singh Rajinder Singh Kaler [online]. Rajpura Road, Patiala, Punjab 147002, India: Punjabi University, Department of Electronics and Communication Engineering, 2015 [cit. 2017-02-19]. Dostupné z: https://www.dropbox.com/sh/0fya1o4zxvvnlwz/AACMiPvpRVgIPpQilwm5W8vMa/Vlaknova/Jakub%20Kolar-Jan%20Wasseubauer-Miroslav%20Vecera?dl=0&preview=OE_54_10_100901.pdf
- [22] Gain Profile Optimization for Raman+EDFA Hybrid Amplifiers with Recycled Pumps for WDM Systems: Márcia M. Jardim Martini Carlos Eduardo S. Castellani Maria José Pontes Moisés R. N. [online]. Brazil: Journal of Microwaves, Optoelectronics and Electromagnetic Applications, 2010 [cit. 2017-02-19]. Dostupné z: <https://www.dropbox.com/sh/0fya1o4zxvvnlwz/AAB7e20-04PMZEovahLDO1Qua/Vlaknova/Zesilovace%20obecne/v9n2a04.pdf?dl=0>
- [23] Performance Analysis of Hybrid Optical Amplifiers for multichannel WDM systems: Ramandeep Kaur [online]. Thapar University India: Department of Electronics and Communication Engineering, 2011 [cit. 2017-02-19]. Dostupné z: https://www.dropbox.com/sh/0fya1o4zxvvnlwz/AADnzm3cQBLE5-wAsiAt3gxa/Vlaknova/Zesilovace%20obecne?dl=0&preview=Ramandeep_Kaur_800961014.pdf
- [24] DWDM Transmission using Hybrid Optical Amplifiers: Arima Arora , Sanjeev Dewra; ISSN (Online) : 2278 - 1021 [online]. India: Haheed Bhagat Singh State Technical Campus, Ferozepur, 2014 [cit. 2017-02-19]. Dostupné z: <http://www.ijarcce.com/upload/2014/april/IJARCCCE1E%20%20%20s%20garima%20DWDM%20Transmission%20using.pdf>
- [25] Studium vláknově optických zesilovačů pro optické sítě: Kolář, Jakub [online]. Ostrava Czech republic: Vysoká škola Báňská Technická univerzita, 2016 [cit. 2017-02-19]. Dostupné z: <https://dspace.vsb.cz/handle/10084/115854>

Seznam příloh

Příloha A	Manuály k použitým komponentám a zařízením. - Umístěno na CD
Příloha B	Kompletní náměry z testování zesilovacích schopností pro experimentální Erbiem dopovaná optická vlákna spolu s Grafickým vypracováním hodnot. - Umístěno na CD
Příloha C	Kompletní náměry, které byly provedeny v rámci testování optické CWDM sítě před experimentálním testováním zesilovacích vláken. - Umístěno na CD
Příloha D	Kompletní náměry, které byly provedeny v průběhu testování experimentálních vláken nasazených na optické CWDM síti. - Umístěno na CD
Příloha E	Schémata se zapojením topologie CWDM v rámci simulování v programovém prostředí Optiwave OptiSystem. - Umístěno na CD

Error! No text of specified style in document.
